



TESIS (RC 185401)

ANALISIS MODULUS KEKAKUAN CAMPURAN ASPAL BETON DENGAN PENGGUNAAN AGREGAT BUATAN BERBAHAN GEOPOLIMER

GUSTI MADE BAGUS BASKARA

NRP. 03111750060008

DOSEN PEMBIMBING

Ir. Ervina Ahyudanari, ME. Ph.D.

PROGRAM MAGISTER

BIDANG KEAHLIAN MANAJEMEN REKAYASA TRANSPORTASI

DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL

FAKULTAS TEKNIK SIPIL, LINGKUNGAN, DAN KEBUMIHAN

INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

SURABAYA

2019



THESIS (RC 185401)

ANALYSIS OF STIFFNESS MODULUS OF CONCRETE ASPHALT MIXTURE WITH THE ADDITION OF ARTIFICIAL AGGREGATES MADE FROM GEOPOLYMER

GUSTI MADE BAGUS BASKARA

NRP . 03111750060008

SUPERVISOR

Ir. Ervina Ahyudanari, ME. Ph.D.

MAGISTER PROGRAMME

TRANSPORTATION MANAGEMENT ENGINEERING

DEPARTEMENT OF CIVIL ENGINEERING

FACULTY OF CIVIL, ENVIRONMENTAL, AND GEO ENGINEERING

SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY

SURABAYA

2019

**Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Teknik (M.T.)
di**

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

**Gusti Made Bagus Baskara
NRP. 03111750060008**

**Tanggal Ujian : 22 Januari 2019
Periode Wisuda : Maret 2019**

Disetujui oleh:



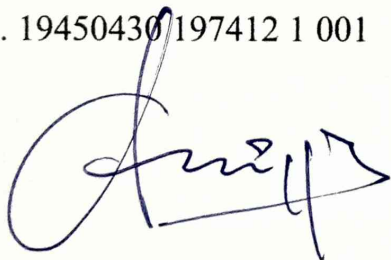
1. Ir. Ervina Ahyudanari, M.E., Ph.D.
NIP. 19690224 199512 2 001

(Pembimbing)



2. Prof. Ir. Indrasurya B. Mochtar, M.Sc, Ph.D.
NIP. 19450430 197412 1 001

(Penguji)



3. Dr. Catur Arif P, S.T., M.Eng
NIP. 19700708 199802 1 001

(Penguji)



**Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan, dan Kebumihan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Dekan,**



**U.A. Wamadewanthi, ST., MT., Ph.D.
NIP. 19750212 199903 2 001**

ANALISIS MODULUS KEKAKUAN CAMPURAN ASPAL BETON DENGAN PENGGUNAAN AGREGAT BUATAN BERBAHAN GEOPOLIMER

Nama mahasiswa : Gusti Made Bagus Baskara
NRP : 03111750060008
Dosen Pembimbing : Ir. Ervina Ahyudanari, ME., Ph.D

ABSTRAK

Retak dan deformasi permanen adalah jenis kerusakan utama perkerasan. Mekanisme retak pada perkerasan jalan disebabkan adanya gaya tarik di bagian bawah lapisan perkerasan beraspal akibat beban roda kendaraan. Beban tarik inilah yang menyebabkan retak menjalar kepermukaan. Modulus kekakuan adalah hubungan tegangan dan regangan yang menunjukkan kekakuan dari suatu bahan. Modulus kekakuan merupakan faktor yang sangat penting yang akan mempengaruhi kinerja perkerasan. Jika nilai modulus menurun maka akan menyebabkan perkerasan mudah retak saat menerima beban yang berat.

Campuran perkerasan terdiri atas agregat kasar, agregat halus, *filler* dan menggunakan aspal sebagai bahan pengikat. Seiring perkembangan infrastruktur di Indonesia yang terus meningkat, penggunaan agregat alami pun semakin banyak, sehingga hal ini akan menyebabkan ketersediaan bahan baku agregat alami semakin menipis. Pemanfaatan geopolimer salah satunya dapat dijadikan sebagai agregat buatan untuk mengganti agregat alami. Pada penelitian sebelumnya, geopolimer berbahan *fly ash* dijadikan sebagai agregat buatan yang mampu memperbaiki kualitas aspal dan kinerja dari campuran perkerasan.

Penelitian ini dilakukan dalam beberapa pengujian yaitu pengujian *Marshall* yang bertujuan untuk mengetahui karakteristik dari campuran aspal beton dengan penggunaan agregat buatan berbahan geopolimer dengan menggunakan gradasi rapat yang mengacu pada peraturan spesifikasi (FAA) *Federal Aviation Administration* dan gradasi terbuka sesuai spesifikasi (BBA) *Béton Bitumineux Aéronautiques*, serta meninjau modulus kekakuan campuran perkerasan gradasi terbuka. Pengujian dilakukan pada dua kondisi yaitu pengujian pada kondisi kering dengan suhu 20°C dan pengujian pada variasi lama perendaman selama 30 menit pada suhu 60°C dan 1 hari pada suhu 20°C. Hasil yang didapatkan dengan menggunakan metode ITSM (*Indirect Tensile Stiffness Modulus*) dengan alat *Dynapave* UTM30 yang dilakukan di Laboratorium Perhubungan dan Bahan Konstruksi Jalan Universitas Udayana adalah nilai modulus kekakuan campuran perkerasan dengan gradasi BBA (*Béton Bitumineux Aéronautiques*) sebesar 3223 Mpa dan nilai modulus kekakuan campuran perkerasan yang telah direndam selama 1 hari sebesar 3152,33 Mpa, sedangkan untuk nilai modulus kekakuan campuran perkerasan yang dilakukan pengujian pada suhu 60°C sebesar 129 Mpa.

Kata kunci: agregat buatan, *fly ash*, geopolimer, modulus kekakuan, perkerasan landas pacu.

**ANALYSIS OF STIFFNESS MODULUS OF CONCRETE ASPHALT
MIXTURE WITH THE ADDITION OF ARTIFICIAL AGGREGATES MADE
FROM GEOPOLYMERS**

By : Gusti Made Bagus Baskara
Student Identity Number : 03111750060008
Supervisor : Ir. Ervina Ahyudanari, ME., Ph.D

ABSTRACT

Cracks and permanent deformation are the main types of pavement damage. The mechanism of cracking on road pavement is due to the attraction at the bottom of the paved pavement layer due to the wheel load of the vehicle. This pull load causes cracks to spread to the surface. Stiffness modulus is the relationship of stress and strain which shows the stiffness of a material. Stiffness modulus is a very important factor that will affect the performance of the pavement. If the modulus decreases it will cause the pavement to crack easily when receiving heavy loads.

The pavement mixture consists of coarse aggregates, fine aggregates, fillers and uses asphalt as a bonding material. As the development of infrastructure in Indonesia continues to improve, the use of natural aggregates is increasing, so that this will cause the availability of natural aggregates to dwindle. One of the uses of geopolymers can be used as artificial aggregates to replace natural aggregates. In the previous study, geopolymers made from fly ash were made as artificial aggregates capable of improving the quality of asphalt and the performance of the pavement mixture.

This research was carried out in several tests including Marshall testing which aims to determine the characteristics of concrete asphalt mixture with the use of artificial aggregates made from geopolymers by using a gradation that refers to the Federal Aviation Administration (FAA) regulations and open gradations according to specifications (BBA) Béton Bitumineux Aéronautiques, and reviewing the stiffness modulus of open graded concrete asphalt mixture. Tests carried out on two conditions, namely testing in dry conditions with a temperature of 20 ° C and testing on variations in immersion time for 30 minutes at 60°C and 1 day at 20°C. The results obtained using the ITSM (Indirect Tensile Stiffness Modulus) method with the UTM30 Dynapave tool conducted at the Udayana University Transportation and Road Construction Materials Laboratory are pavement stiffness modulus values with BBA (Béton Bitumineux Aéronautiques) gradations of 3223 Mpa and mixed stiffness modulus values the pavement which has been soaked for 1 day is 3152.33 MPa, while for the stiffness modulus value of the pavement mixture which is tested at 60 ° C is 129 Mpa.

Keywords: *artificial aggregates, fly ash, geopolymer, stiffness modulus, runway pavement.*

KATA PENGANTAR

Puji syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa atas segala karunia dan hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis yang berjudul *Analisis Modulus Kekakuan Campuran Aspal Beton Dengan Penggunaan Agregat Buatan Berbahan Geopolimer*. Tesis ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat dalam menyelesaikan kuliah Program Magister, Bidang Keahlian Manajemen Rekayasa Transportasi, Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan dan Kebumihan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Penyusunan tesis ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak, oleh karena itu penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Terimakasih untuk kedua orang tua Bapak Ir. Ketut Suatika dan Mamake Ni Ketut Suandariani yang selalu menopang penulis apapun keadaannya, yang tak pernah lelah memberikan semangat, dorongan, nasehat, kasih sayang, serta pengorbanan yang tak akan pernah tergantikan oleh siapapun, dan yang tak pernah henti memberikan doa restunya sehingga penulis bisa sampai pada ke tahap ini.
2. Terimakasih untuk kakak tercinta Gusti Putu Ayu Astari dan adik tersayang Gusti Komang Gede Candra Cahyadi yang membuat penulis semangat agar lulus tepat waktu.
3. Ir. Ervina Ahyudanari, ME., Ph.D selaku Dosen Pembimbing.
4. Prof. Ir. Indrasurya B. Mochtar, Msc., Ph.D selaku Dosen penguji.
5. Ir. Hera Widyastuti, MT., Ph.D selaku Dosen penguji.
6. Dr. Catur Arif Prastyanto, ST., M.Eng selaku Dosen penguji.
7. Seluruh dosen pengajar bidang keahlian Manajemen Rekayasa Tansportasi, Departemen Teknik Sipil, FTSLK, ITS.
8. Seluruh teknisi Laboratorium Perhubungan dan Bahan Konstruksi Jalan serta Laboratorium Struktur Departemen Teknik Sipil, FTSLK, ITS, yang selalu membantu kegiatan penelitian.
9. Teman-teman Manajemen Rekayasa Tansportasi angkatan 2017 Departemen Teknik Sipil, FTSLK, ITS.

10. Semua pihak yang membantu dalam proses penyusunan tesis ini, yang tidak dapat disebutkan satu–persatu.

Dengan segala kerendahan hati, penulis menyadari bahwa dalam Tesis ini masih jauh dari sempurna. Untuk itu kritik dan saran yang bersifat membangun dari pembaca sangat penulis harapkan, akhir kata semoga Tesis ini dapat bermanfaat bagi pembaca.

Surabaya, Januari 2019

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
ABSTRAK	iii
<i>ABSTRACT</i>	iv
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xi
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	5
1.3 Batasan Masalah	6
1.4 Tujuan Penelitian	7
1.5 Manfaat Penelitian	7
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Umum	9
2.2 Agregat	10
2.2.1 Jenis Agregat	10
2.3 Gradasi Campuran	11
2.4 Geopolimer	15
2.4.1 Penggunaan Geopolimer	16
2.4.2 Material Penyusun Geopolimer	16
2.4.3 Proporsi Campuran Geopolimer	18
2.5 Pengujian <i>Indirect Tensile Strenght</i>	18
BAB III METODOLOGI	
3.1 Rancangan Penelitian	23

3.2	Studi Literatur	23
3.3	Proses Penelitian di Laboratorium	23
3.3.1	Pembuatan Agregat Buatan Berbahan <i>Fly Ash</i> Geopolimer	23
3.3.2	Pengujian Material	25
3.3.3	Mix Desain Campuran Aspal Beton.....	27
3.3.4	Pembuatan Benda Uji Campuran Aspal Beton.....	28
3.3.5	Rekapitulasi Jumlah kebutuhan Benda Uji.....	32
3.4	Analisis Data	33
3.4.1	Analisis Material Agregat Buatan.....	33
3.4.2	Analisis Agregat.....	33
3.4.3	Analisis Pengujian ITS.....	34
3.5	Tahapan Penelitian	35
BAB IV DATA DAN ANALISIS PENELITIAN		
4.1	Pengujian Material.....	37
4.1.1	Aspal.....	37
4.1.2	Agregat Kasar	38
4.1.3	Agregat Halus	39
4.1.4	Agregat Buatan Geopolimer	40
4.2	Pembuatan Agregat Buatan Geopolimer	41
4.3	Perencanaan Campuran Aspal Beton	43
4.4	Penentuan Komposisi Aspal Terhadap Campuran.....	44
4.5	Penentuan Kadar Aspal Optimum.....	45
4.5.1	Kadar Aspal Optimum Gradasi Terbuka (BBA)	45
4.5.2	Kadar Aspal Optimum Gradasi Rapat (FAA).....	51
4.6	Desain Campuran Aspal Beton dengan Penggunaan Agregat Buatan Geopolimer.....	53

4.7	Hasil Pengujian Karakteristik Campuran	55
4.7.1	Pengaruh Variasi Gradasi Terhadap Karakteristik Aspal Beton	55
4.7.2	Pengujian Perendaman <i>Marshall (Immersion Test)</i>	62
4.7.3	Pengujian <i>Indirect Tensile Strenght (ITS)</i>	64
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		
5.1	Kesimpulan	69
5.2	Saran	70
DAFTAR PUSTAKA		
BIOGRAFI PENULIS		

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Mekanisme Terjadinya Gaya Tarik dan Kerusakan Retak	1
Gambar 1.2	<i>Fishbone</i> Diagram	5
Gambar 2.1	Grafik yang menunjukkan berbagai jenis gradasi	12
Gambar 2.2	Grafik yang menunjukkan gradasi rapat spesifikasi FAA	15
Gambar 2.3	Grafik yang menunjukkan gradasi terbuka spesifikasi BBA	15
Gambar 2.4	Ilustrasi pembebanan pada ITS (<i>Indirect Tensile Strength</i>)	20
Gambar 3.1	Mesin Granulator	24
Gambar 3.2	Alat dan Benda Uji ITS	32
Gambar 3.3	Bagan Alir Pembuatan Agregat Buatan Geopolimer	35
Gambar 3.4	Bagan Alir Pembuatan Campuran Aspal dengan Penambahan Agregat Geopolimer	36
Gambar 4.1	Pengujian Aspal	37
Gambar 4.2	Agregat Kasar	38
Gambar 4.3	Pengujian Agregat Halus	39
Gambar 4.4	Fly Ash dan Alkali Aktivator	42
Gambar 4.5	Proses Pembuatan Agregat Buatan dengan Menggunakan Mesin Granulator	43
Gambar 4.6	Menentukan Kadar Aspal Optimum	51
Gambar 4.7	Grafik Penentuan Kadar Aspal Optimum Gradasi Rapat	53
Gambar 4.8	Pengaruh Gradasi Agregat Terhadap Kadar Aspal Optimum	56
Gambar 4.9	Pengaruh Gradasi Agregat Terhadap Stabilitas	57
Gambar 4.10	Pengaruh Gradasi Agregat Terhadap <i>Flow</i>	57
Gambar 4.11	Pengaruh Gradasi Agregat Terhadap <i>Marshall Quotient</i>	58
Gambar 4.12	Pengaruh Gradasi Agregat Terhadap <i>Void in Mixture</i>	59
Gambar 4.13	Pengaruh Gradasi Agregat Terhadap <i>Void in the Mineral Agregate</i>	60
Gambar 4.14	Pengaruh Gradasi Agregat Terhadap <i>Volume of voids Filled Bitument</i> ..	62
Gambar 4.15	Pengujian ITSM (<i>Indirect Tensile Stiffness Modulus</i>)	64
Gambar 4.16	Hubungan Antara Lama Perendaman Dengan Nilai Modulus	66
Gambar 4.17	Nilai Modulus campuran pada temperatur 20°C dan temperatur 60°C	67

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Spesifikasi Gradasi Agregat Untuk Bandara	14
Tabel 2.2	Spesifikasi Gradasi Agregat Untuk Bandara	14
Tabel 3.1	Perhitungan berat material yang dibutuhkan pada gradasi rapat	24
Tabel 3.2	Perhitungan berat material yang dibutuhkan pada gradasi terbuka	25
Tabel 3.3	Metode Pemeriksaan Aspal	26
Tabel 3.4	Metode Pemeriksaan Agregat Kasar	26
Tabel 3.5	Metode Pemeriksaan Agregat Buatan	27
Tabel 3.6	Metode Pemeriksaan Bahan Pengisi (<i>filler</i>)	27
Tabel 3.7	Gradasi Agregat yang Digunakan	28
Tabel 3.8	Kebutuhan benda uji untuk pengujian <i>Marshall</i>	29
Tabel 3.9	Kriteria perencanaan untuk Pengujian <i>Marshall</i>	30
Tabel 3.10	Kebutuhan benda uji untuk pengujian perendaman	31
Tabel 3.11	Kebutuhan benda uji untuk pengujian ITS	31
Tabel 3.12	Rekapitulasi Jumlah Kebutuhan Benda Uji	33
Tabel 4.1	Hasil Pengujian Aspal	37
Tabel 4.2	Hasil Pengujian Agregat Kasar	38
Tabel 4.3	Hasil Pengujian Agregat Halus dan <i>Filler</i>	39
Tabel 4.4	Hasil Pengujian Agregat Buatan Geopolimer	40
Tabel 4.5	Proporsi Agregat	43
Tabel 4.6	Kadar Aspal Perkiraan dan Kebutuhan Agregat pada Campuran Gradasi Rapat	44
Tabel 4.7	Kadar Aspal Perkiraan dan Kebutuhan Agregat pada Campuran Gradasi Terbuka	45
Tabel 4.8	Data Hasil Pengujian <i>Marshall</i>	47
Tabel 4.9	Hasil Pengujian Karakteristik Campuran Gradasi Terbuka (BBA) Untuk Mencari KAO	51
Tabel 4.10	Hasil Pengujian Karakteristik Campuran Gradasi Rapat (FAA) Untuk Mencari KAO	53
Tabel 4.11	Hasil Perhitungan Kadar Aspal Optimum	53
Tabel 4.12	Kebutuhan Agregat Campuran dengan Gradasi Agregat Rapat (FAA) ..	54

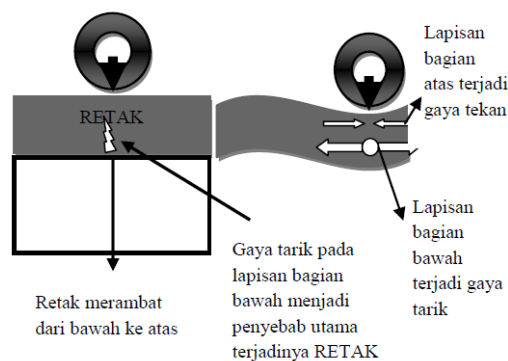
Tabel 4.13	Kebutuhan Material Campuran dengan Gradasi Agregat Terbuka (BBA)	54
Tabel 4.14	Hasil Pengujian Karakteristik Campuran dengan Variasi Gradasi Agregat	55
Tabel 4.15	Data Hasil Pengujian Perendaman	63
Tabel 4.16	Hasil Pengujian Perendaman	63
Tabel 4.17	Hasil nilai modulus dari pengujian ITSM	65
Tabel 4.18	Hasil nilai Modulus Kekakuan dan TSR	66

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Di lapangan suatu lapisan perkerasan akan mengalami dua pembebanan yaitu beban tekan dan beban tarik. Berbeda dengan beban tekan yang secara empirik dapat diperoleh dengan pengujian *Marshall* secara langsung, besarnya beban tarik tidak dapat dilakukan pengujian secara langsung dengan *Marshall* karena terdapat *ring* / cincin penahan. Padahal pada kondisi lapangan beban tarik yang sering menyebabkan retak, diawali dengan adanya retak awal (*crack initiation*) pada bagian bawah lapisan perkerasan yang kemudian akan menjalar ke permukaan yang menyebabkan terjadinya deformasi (*rutting*).



Gambar 1.1 Mekanisme Terjadinya Gaya Tarik dan Kerusakan Retak
(Sunarjono et al., 2012)

Menurut *Asphalt Institute*, (1986), *Indirect Tensile Strength* (ITS) adalah kemampuan lapis perkerasan menahan kuat tarik yang disebabkan oleh beban kendaraan. Prediksi yang akurat terhadap respon dan performa perkerasan membutuhkan model teoritis yang mewakili kondisi struktur perkerasan dan masing-masing material dalam campurannya. Pengujian ITS telah berhasil digunakan untuk mengetahui kegagalan tarik dan retak pada campuran aspal (Mitchell et al., 2011).

Dalam perencanaan campuran aspal menggunakan beberapa parameter untuk mencapai kekuatan dan keawetan. Salah satu parameter campuran aspal agar

kekuatan dan keawetan tercapai sesuai kebutuhan adalah tegangan dan regangan yang menunjukkan kekakuan dari suatu bahan. Nilai kekakuan bahan biasa dinilai dari modulus bahannya yaitu modulus elastisitas. Modulus elastisitas merupakan ukuran kekakuan (*stiffness*) suatu material, sehingga semakin tinggi nilai modulus elastisitas bahan, maka semakin sedikit perubahan bentuk yang terjadi apabila diberi gaya. Jadi, semakin besar nilai modulus kekakuan maka semakin kecil regangan elastis yang terjadi atau semakin kaku (*stiff*) (Widodo & Setyaningsih, 2011).

Campuran beraspal merupakan material yang tidak bersifat elastis sempurna maka pemakaian istilah modulus elastisitas (E) tidak cocok digunakan dan sebagai gantinya digunakan istilah modulus kekakuan campuran (*Stiffness modulus*). Modulus kekakuan merupakan angka yang digunakan untuk mengukur objek atau ketahanan bahan untuk mengalami deformasi elastis ketika gaya diterapkan pada benda itu. Seperti diketahui bahwa hampir seluruh material perkerasan tidak bersifat elastis tapi mengalami deformasi permanen setelah menerima pengulangan beban. Tetapi jika beban tersebut relatif kecil terhadap kekuatan material, maka deformasi permanen yang terjadi pada setiap pengulangan beban yang tinggi hampir dapat kembali secara sempurna dan proporsional terhadap beban. Pada kondisi ini material tersebut dapat dipertimbangkan sebagai material yang elastis (Huang, 1993).

Aspal beton merupakan salah satu jenis dari lapis perkerasan konstruksi perkerasan lentur. Kekuatan dari perkerasan beton aspal diperoleh melalui struktur agregat yang saling mengunci (*interlocking*). Struktur agregat yang saling mengunci (*interlocking*) ini menghasilkan geseran internal yang tinggi dan saling melekat bersama oleh lapis tipis aspal perekat diantara butiran agregat (Suherman, 2012). Perkerasan beton aspal ini cukup peka terhadap variasi kadar aspal dan perubahan gradasi agregat, hal ini disebabkan karena beton aspal memiliki sifat stabilitas tinggi dan relatif kaku, yaitu tahan terhadap pelelehan plastis namun cukup peka terhadap retak.

Sebagian besar bahan penyusun aspal beton adalah agregat. Agregat merupakan material yang rentan terkena kerusakan oleh air karena sifatnya yang *hydrophobic*, sehingga dalam perencanaan dibutuhkan perhitungan yang matang

agar lapisan dapat secara efektif berfungsi sesuai dengan umur rencana dan indeks pelayanan akhir yang diharapkan (Tajudin & Suparma, 2017). Kerusakan akibat air pada lapis aspal beton dapat disebabkan karena beberapa faktor, yaitu: (1) Jenis agregat, baik agregat kasar dan halus harus diuji ketahanannya terhadap air. (2) Sumber minyak dan proses distilasinya sampai menjadi aspal. (3) Propertis campuran aspal beton. Kadar rongga udara dan permeabilitas campuran yang dipengaruhi oleh proses pemadatan, gradasi agregat dan kadar aspal menjadi salah satu faktor paling penting karena properti tersebut menentukan tingkat kejenuhan dan pengaliran air. (4) Ketebalan lapis aspal juga berpengaruh pada kerentanan campuran terhadap air karena akan menentukan durabilitas campuran. (5) Kondisi lingkungan volume lalu lintas yang tinggi (Sengoz & Agar, 2007).

Oleh karena itu, agregat dalam campuran aspal beton merupakan komponen utama dalam memberikan nilai stabilitas dan nilai modulus maka agregat harus memiliki kekuatan dan daya tahan yang baik untuk mencegah kehancuran akibat pembebanan lalu lintas yang tinggi.

Campuran aspal beton tersebut terdiri atas agregat kasar, agregat halus, *filler* dan menggunakan aspal sebagai bahan pegikat. Seiring perkembangan infrastruktur di Indonesia yang terus meningkatkan, penggunaan agregat alami pun semakin banyak, sehingga hal ini akan menyebabkan ketersediaan bahan baku agregat alam semakin menipis. Pemanfaatan geopolimer salah satunya dapat dijadikan sebagai agregat buatan dalam campuran aspal beton. Seperti yang telah dilakukan oleh Ahyudanari, dkk (2016) dimana agregat kasar, agregat buatan geopolimer, dan aspal dicampur menjadi satu sesuai proporsi, kemudian dipadatkan menjadi perkerasan aspal beton. Dari hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa campuran aspal geopolimer tersebut mempunyai stabilitas yang tinggi, tetapi disisi lain rongga yang terbentuk semakin besar (Ahyudanari, dkk, 2016). Oleh sebab itu, diperlukan adanya penelitian lebih lanjut terhadap karakteristik campuran aspal geopolimer terhadap kuat tarik tidak langsung agar dapat diketahui modulus kekakuan pada penggunaan campuran aspal beton dengan penambahan agregat buatan geopolimer.

Material utama untuk pembentukan geopolimer yang memiliki ikatan alumino-silikat harus kaya akan silika dan alumunium. *Fly ash* sendiri tidak

memiliki kemampuan mengikat, namun dengan kehadiran air dan ukuran partikelnya yang halus, oksida silika yang terkandung dalam *fly ash* akan bereaksi kimia dengan campuran sodium silikat (Na_2SiO_3) dan natrium hidroksida (NaOH) yang menghasilkan zat yang memiliki kemampuan mengikat. Geopolimer ini merupakan polimer *thermosetting*, yaitu polimer yang hanya sekali mengeras dan tidak dapat menjadi lunak kembali (Davidovits, 2008).

Batubara adalah bahan bakar fosil, di mana di Indonesia tersedia cadangannya dalam jumlah yang cukup melimpah dan diperkirakan mencapai 30 juta ton. Dengan kualitas batubara yang baik dan dengan jumlah yang besar tersebut serta tingkat produksi saat ini, batubara dapat menjadi sumber energi bagi Indonesia selama ratusan tahun. Dari pembakaran batubara dihasilkan sekitar 5% polutan padat yang berupa abu (*fly ash* dan *bottom ash*), di mana sekitar 10-20% adalah *bottom ash* dan sekitar 80-90% *fly ash* dari total abu yang dihasilkan.

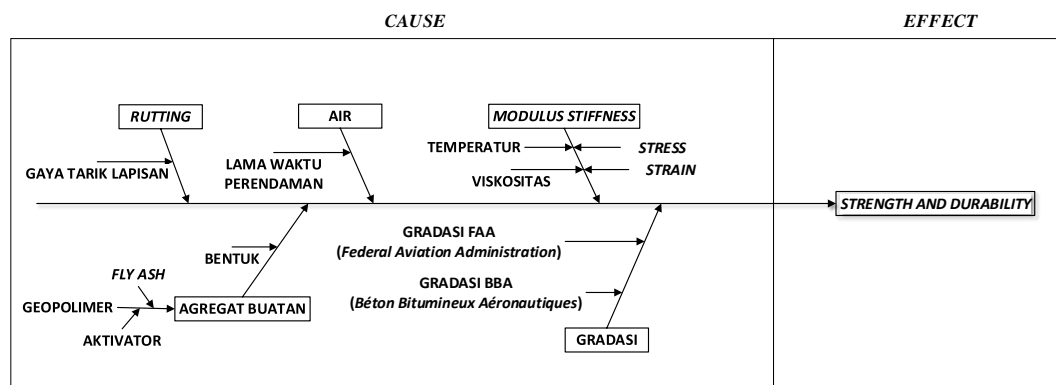
Besarnya jumlah residu (*fly ash*) tersebut akan menimbulkan masalah terutama dalam proses pembuangannya karena dapat mencemari lingkungan sekitar serta membutuhkan fasilitas pembuangan yang relatif mahal (Wardani, 2008), 2008). Untuk itu residu tersebut mulai diolah sebagai bahan bangunan teknik sipil misalnya sebagai *fly ash cement*, bahan campuran batako, sebagai bahan urugan, dan dapat juga dipakai sebagai material lapisan perkerasan.

Pada penelitian sebelumnya ditemukan bahwa campuran beraspal dengan agregat buatan berbahan *fly ash geopolimer* yang disebutkan diatas telah memenuhi syarat spesifikasi dan memiliki nilai stabilitas *marshall* yang baik seperti penggunaan agregat alami. Sehingga dalam penelitian ini akan digunakan agregat buatan *fly ash geopolimer* sebagai bahan campuran perkerasan (Yuliana, 2018).

Setiap jenis campuran aspal beton untuk lapisan perkerasan mempunyai gradasi agregat tertentu. Gradasi agregat dinyatakan dalam persentase lolos, atau persentase tertahan, yang dihitung berdasarkan berat agregat dengan menggunakan satu set saringan agregat. Gradasi agregat dapat dikatakan sangat mempengaruhi pada kinerja campuran beraspal karena gradasi agregat berfungsi memberikan kekuatan dan daya tahan deformasi yang pada akhirnya mempengaruhi stabilitas, kepadatan (*density*), dan porositas dalam campuran, dengan kondisi saling mengunci (*interlocking*) dari masing- masing partikel agregat kasar (Sumiati &

Sukarman, 2014). Oleh karena itu, penentuan gradasi agregat dapat mengidentifikasi nilai karakteristik *marshall* dari campuran serta karakteristik kekakuan (*stiffness*) dari suatu campuran beraspal. Ada dua Gradasi yang akan digunakan pada penelitian ini yaitu gradasi rapat mengikuti aturan spesifikasi *Federal Aviation Administration* (FAA) dan gradasi terbuka mengikuti BBA (*Béton Bitumineux Aéronautiques*) (Hakim, 2015). Menurut Hakim (2015) penggunaan gradasi BBA pada lapis perkerasan mampu meningkatkan kinerja suatu perkerasan. Dari hasil analisis desain perkerasan menunjukkan bahwa dapat mengurangi ketebalan lapisan aspal sekitar 15% dibandingkan dengan tebal lapis perkerasan pada umumnya. Dan juga memberikan dampak positif terhadap lingkungan seperti tingkat kebisingan dan emisi gas rumah kaca yang rendah.

Berdasarkan penjelasan dari latar belakang diatas dapat diilustrasikan dalam bentuk *fishbone* diagram seperti Gambar 1.2.



Gambar 1.2 *Fishbone* Diagram

1.2 Perumusan Masalah

Kebutuhan akan material baru untuk menunjang pekerjaan pembangunan infratraktur diakibatkan oleh beberapa faktor. Faktor – faktor tersebut merupakan penyebab berkurangnya umur layan suatu infrastruktur jalan/perkerasan. Dari latar belakang yang disajikan secara singkat pada Gambar 1.2, ada beberapa permasalahan yang perlu diselesaikan yaitu:

1. Berapa nilai kadar aspal optimum campuran aspal beton dengan penggunaan agregat buatan geopolimer pada gradasi FAA (*Federal Aviation Administration*) dan BBA (*Béton Bitumineux Aéronautiques*)?

2. Bagaimana pengaruh gradasi agregat terhadap karakteristik campuran aspal beton dengan penggunaan agregat buatan berbahan geopolimer?
3. Bagaimana ketahanan campuran aspal beton dengan penggunaan agregat buatan geoplimer terhadap kerusakan yang disebabkan oleh air (durabilitas)?
4. Berapa nilai modulus kekakuan campuran aspal beton dengan penggunaan agregat buatan geoplimer dengan menggunakan uji *Indirect Tensile Strenght*?
5. Bagaimana pengaruh lama perendaman terhadap nilai modulus kekakuan campuran aspal dengan melakukan pengujian kuat tarik tidak langsung (*Indirect Tensile Strenght*) pada campuran aspal dengan penambahan agregat buatan berbahan geopolimer?

1.3 Batasan Masalah

Untuk memfokuskan pembahasan, maka pada penelitian diberikan batasan-batasan masalah sebagai berikut:

1. Aspal yang digunakan adalah aspal keras penetrasi 60/70.
2. Pada penelitian ini komposisi agregat buatan yang digunakan mengikuti komposisi campuran yang telah ditentukan pada penelitian yang telah ada
3. Geopolimer yang digunakan adalah *fly ash* batu bara dan activator NaOH dan Na_2SiO_3 .
4. Rasio proporsi perbandingan agregat buatan dan agregat alami sebesar 25% : 75% pada agregat kasar.
5. Agregat alami yang digunakan sebagai bahan campuran perkerasan adalah material dari provinsi Jawa Timur.
6. Gradasi agregat yang digunakan sesuai dengan spesifikasi FAA (*Federal Aviation Administration*) dan BBA (*Beton Bitumineux Aeronautiques*) untuk perkerasan bandara.
7. Tinjauan terhadap karakteristik campuran terbatas pada pengamatan terhadap hasil pengujian kuat tarik.
8. Pengujian kuat tarik dilakukan hanya pada campuran aspal bergradasi terbuka (BBA).

9. Penelitian ini hanya sebatas penerapan di laboratorium.

1.4 Tujuan Penelitian

Dari permasalahan terkait kebutuhan akan material baru untuk menunjang pekerjaan pembangunan infratraktur jalan/perkerasan, maka dilakukan penelitian penggunaan material baru pada campuran perkerasan. Dari latar belakang di atas maka penelitian ini bertujuan untuk:

1. Mengetahui kadar aspal optimum campuran aspal beton dengan penambahan agregat buatan geopolimer pada gradasi FAA (*Federal Aviation Administration*) dan BBA (*Béton Bitumineux Aéronautiques*).
2. Mengetahui pengaruh gradasi agregat terhadap karakteristik campuran aspal beton dengan penggunaan agregat buatan berbahan geopolimer.
3. Mengetahui ketahanan campuran aspal beton dengan penggunaan agregat buatan geopolimer terhadap kerusakan yang disebabkan oleh air (durabilitas).
4. Mengetahui nilai modulus kekakuan campuran aspal beton dengan penggunaan agregat buatan geopolimer.
5. Mengetahui pengaruh lama perendaman terhadap nilai modulus kekakuan campuran aspal dengan melakukan pengujian kuat tarik tidak langsung (*Indirect Tensile Strength*) pada campuran aspal dengan penggunaan agregat buatan berbahan geopolimer.

1.5 Manfaat Penelitian

Dengan adanya penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Usaha pemanfaatan bahan terbuang menjadi bahan yang berguna sehingga dapat memberikan kontribusi ilmiah dalam pengembangan ilmu pengetahuan, khususnya dalam bidang perkerasan jalan.
2. Menambah alternatif penggunaan bahan perkerasan yang lebih ekonomis dan ramah lingkungan.
3. Dapat mengetahui kelayakan dan kinerja penggunaan campuran aspal beton dengan penggunaan agregat buatan geopolimer.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Umum

Aspal beton merupakan salah satu jenis lapis perkerasan yang umum digunakan di Indonesia, yang terdiri dari campuran aspal keras, filler dan agregat bergradasi menerus, yang dicampur, dihamparkan dan dipadatkan pada suhu tertentu. Campuran Laston memerlukan proses pencampuran yang menggunakan material-material yang telah memenuhi spesifikasi baik itu aspal maupun agregatnya (Agus & Widhiawati, 2010).

Daya ikat (*interlocking*) antar agregat merupakan penyokong utama bagi kekuatan dan performa material pada struktur perkerasan. Oleh karena itu, permukaan jalan dapat menahan beban dengan baik ketika kendaraan melewatinya. (D'Angelo et al., 2008).

Uji kuat tarik tidak langsung pada campuran *asphalt concrete* adalah prosedur yang sering digunakan untuk memperkirakan kemungkinan kinerja perkerasan. Saat ini, uji kuat tarik tidak langsung banyak digunakan untuk mengetahui kerentanan terhadap kelembaban. Namun, uji kuat tarik tidak langsung juga dapat digunakan untuk menentukan sifat teknik yang diperlukan untuk analisis elastis dan viskoelastis dan untuk mengevaluasi retak *thermal*, retak kelelahan, dan masalah lain yang potensial. Dari uji ini akan nampak kurangnya informasi mengenai faktor yang menentukan *indirect tensile strength* (ITS) campuran aspal. Oleh karena itu, sifat fisik dan komposisi aspal berpengaruh pada nilai ITS yang diperoleh (Garrick & Biskur, 1990).

Kekuatan tarik dipengaruhi oleh temperatur dan lama pembebanan. Kenaikan temperatur akan menyebabkan kekentalan aspal menurun. Hal ini disebabkan oleh meningkatnya energi thermal (*thermal energy*) dan melarutnya *asphaltenes* ke dalam oil. Jika dikaitkan dengan lalu lintas maka pembebanan yang lama akan terjadi pada lalu lintas dengan kecepatan rendah atau sebaliknya. Semakin lama pembebanan pada perkerasan maka aspal yang semula bersifat elastik akan menjadi bersifat lebih viscos (Suprpto, 2004).

2.2 Agregat

Sebagian besar bahan penyusun aspal beton adalah agregat. Agregat merupakan material yang rentan terkena kerusakan oleh air karena sifatnya yang *hydrophobic*, sehingga dalam perencanaan dibutuhkan perhitungan yang matang agar lapisan dapat secara efektif berfungsi sesuai dengan umur rencana dan indeks pelayanan akhir yang diharapkan.

2.2.1 Jenis Agregat

Jenis agregat untuk campuran beraspal dapat diklasifikasikan berdasarkan proses pengolahannya.

1) Agregat alam

Agregat alam (*natural aggregates*) adalah agregat yang dapat dipergunakan sebagaimana bentuknya di alam atau dengan sedikit proses pengolahan. Agregat ini terbentuk melalui proses erosi dan degradasi. Bentuk partikel dari agregat alam ditentukan proses pembentukannya.

2) Agregat melalui proses pengolahan

Agregat yang diproses adalah batuan yang telah dipecah dan disaring sebelum digunakan. Digunung-gunung atau dibukit-bukit, dan sungai-sungai sering ditemui agregat yang masih berbentuk batu gunung, dan ukuran yang besar-besar sehingga diperlukan proses pengolahan terlebih dahulu sebelum dapat digunakan sebagai agregat konstruksi jalan.

3) Agregat buatan

Agregat ini didapatkan dari proses kimia atau fisika dari beberapa material sehingga menghasilkan suatu material baru yang sifatnya menyerupai agregat. Agregat yang merupakan mineral *filler*/pengisi (partikel dengan ukuran $< 0,075$ mm), diperoleh dari hasil sampingan pabrik-pabrik semen atau mesin pemecah batu. Pembuatan agregat buatan secara langsung adalah suatu yang relatif baru. Agregat ini dibuat dengan membakar tanah liat dan material lainnya. Produk akhir yang dihasilkan biasanya agak ringan dan tidak memiliki daya tahan terhadap keausan yang tinggi. Agregat buatan dapat digunakan untuk dek jembatan atau untuk perkerasan jalan dengan mutu sebaik lapisan permukaan yang

mensyaratkan ketahanan gesek maksimum. Menurut Karyawan, dkk (2017) fly ash bisa dimanfaatkan sebagai bahan dasar pembuatan agregat buatan geopolimer untuk pengganti agregat alami dalam campuran aspal beton. Yang memiliki kekuatan tekan yang lebih tinggi menyebabkan hasil yang lebih baik dari sifat agregat buatan.

Sudrajat, (2016) melakukan penelitian mengenai pemanfaatan material fly ash dengan cara mengolahnya menjadi agregat buatan yang memiliki campuran dengan kinerja yang memenuhi spesifikasi, yaitu spesifikasi umum Bina Marga 2010 revisi 3. Pengujian dilakukan berdasarkan Spesifikasi Umum Bina Marga 2010 revisi 3. Agregat buatan diolah menggunakan mesin granulator dengan komposisi *fly ash* dan aktivator sebesar 74%:26% dimana perbandingan massa alkali aktivatornya adalah 1:2,5.

Yuliana dkk, (2018) dalam penelitiannya yang berjudul "*The Effect of Slope Granulator on The Characteristic of Artificial Geopolimer Aggregate Used in Pavement*", menemukan bahwa sudut kemiringan pan mesin granulator saat pembuatan agregat buatan geopolimer yaitu pada kemiringan 50°.

Agregat buatan ini merupakan campuran *fly ash* sebagai bahan dasar pembuatan agregat buatan geopolimer untuk pengganti agregat alami dalam campuran aspal beton. Aktivator yang digunakan adalah sodium silikat (Na_2SiO_3) dan natrium hidroksida (NaOH) dengan konsentrasi sebanyak 8M dan komposisi fly ash dan alkali sebesar 75%:25% (Karyawan dkk., 2017)

2.3 Gradasi Campuran

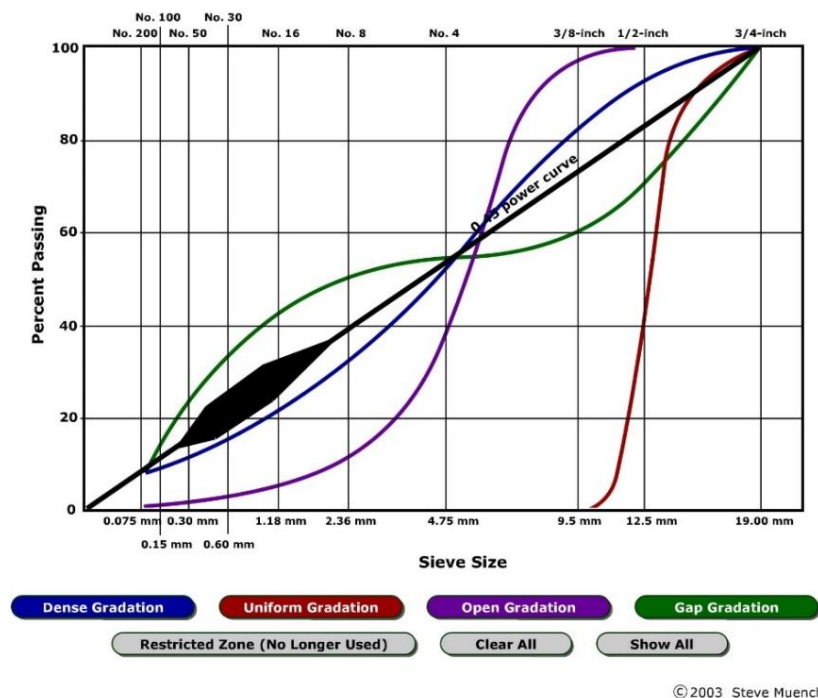
Gradasi adalah salah satu faktor yang berpengaruh terhadap karakteristik agregat dalam menentukan kinerja perkerasan aspal beton. Gradasi agregat ditentukan oleh analisa saringan, dimana contoh agregat harus melalui satu set saringan. Ukuran saringan menyatakan ukuran bukaan jaringan kawatnya dan nomor saringan menyatakan banyaknya bukaan jaringan kawat per inchi persegi

dari saringan tersebut. Ada beberapa batasan umum yang digunakan untuk mengklasifikasi gradasi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.1.

Seluruh spesifikasi perkerasan menyatakan bahwa partikel agregat harus berada dalam rentang ukuran tertentu dan untuk masing-masing ukuran partikel harus dalam proporsi tertentu. Distribusi dari variasi ukuran butir agregat ini disebut gradasi agregat. Gradasi agregat mempengaruhi besarnya rongga dalam campuran dan menentukan workabilitas (sifat mudah dikerjakan) dan stabilitas campuran.

Gradasi agregat dapat dibedakan atas:

- 1) Gradasi seragam (*uniform graded*) adalah gradasi agregat dengan ukuran yang hampir sama. Artinya, semua partikel memiliki ukuran yang sama. Kurva curam dan hanya menempati kisaran ukuran sempit yang ditentukan.



© 2003 Steve Muench

Gambar 2.1 Grafik yang menunjukkan berbagai jenis gradasi (Kandhal & L.A. Cooley, 2001)

- 2) Gradasi rapat (*dense graded*) / gradasi baik (*well graded*) adalah gradasi agregat dimana agregat yang ukuran butirnya terdistribusi merata dalam satu rentang ukuran butir. Campuran agregat bergradasi baik mempunyai sedikit pori, mudah dipadatkan dan memiliki stabilitas yang tinggi (Sumiati & Sukarman, 2014). Suatu campuran dikatakan bergradasi sangat rapat bila

persentase lolos dari masing-masing saringan memenuhi persamaan berikut:

$$P = 100 \left(\frac{d}{D} \right)^n \quad (2.1)$$

dengan:

d = Ukuran saringan yang ditinjau

D = Ukuran agregat maksimum dari gradasi tersebut

N = 0,35 – 0,45

Campuran dengan gradasi ini memiliki stabilitas yang tinggi, agak kedap terhadap air dan memiliki berat isi yang besar.

- 3) Gradasi terbuka (*open graded*) adalah gradasi agregat yang hanya mengandung sedikit agregat halus sehingga terdapat banyak rongga/ruang kosong antar agregat. Campuran beraspal yang dibuat dengan gradasi ini bersifat porus atau memiliki permeabilitas yang tinggi, stabilitas rendah dan memiliki berat isi yang kecil.
- 4) Gradasi senjang (*gap graded*) adalah gradasi agregat dimana ukuran agregat yang ada tidak lengkap atau ada fraksi agregat yang tidak ada atau jumlahnya sedikit sekali, oleh sebab itu gradasi ini disebut juga gradasi senjang (*gap graded*). Campuran agregat dengan gradasi ini memiliki kualitas peralihan dari kedua gradasi yang disebutkan di atas.

Persyaratan gradasi agregat yang digunakan untuk campuran jalan raya berbeda dengan campuran untuk bandara. Pada penelitian ini akan digunakan gradasi rapat (*Gradation 2*) dari spesifikasi FAA untuk perkerasan *surface* pada *runway* bandara dan gradasi terbuka dari standar spesifikasi BBA. Lapisan ini digunakan sebagai lapisan aus. Lapisan ini dapat menambah daya tahan perkerasan terhadap penurunan mutu sehingga secara keseluruhan menambah masa pelayanan dari konstruksi perkerasan. Persyaratan gradasi agregat untuk bandara ditunjukkan pada Tabel 2.1 dan Tabel 2.2.

Tabel 2.1 Spesifikasi Gradasi Agregat Untuk Bandara

Nomor Saringan	Ukuran Saringan (mm)	% Berat Lolos Saringan AC (BBA)
1"	25,4 mm	-
3/4"	19,1 mm	100
1/2"	12,7 mm	80 - 100
3/8"	9,25 mm	60 - 70
no. 4	4,76 mm	36 - 44
no. 10	2,38 mm	33 - 40
no. 80	0,59 mm	10 - 25
no. 200	0,074 mm	6 - 9

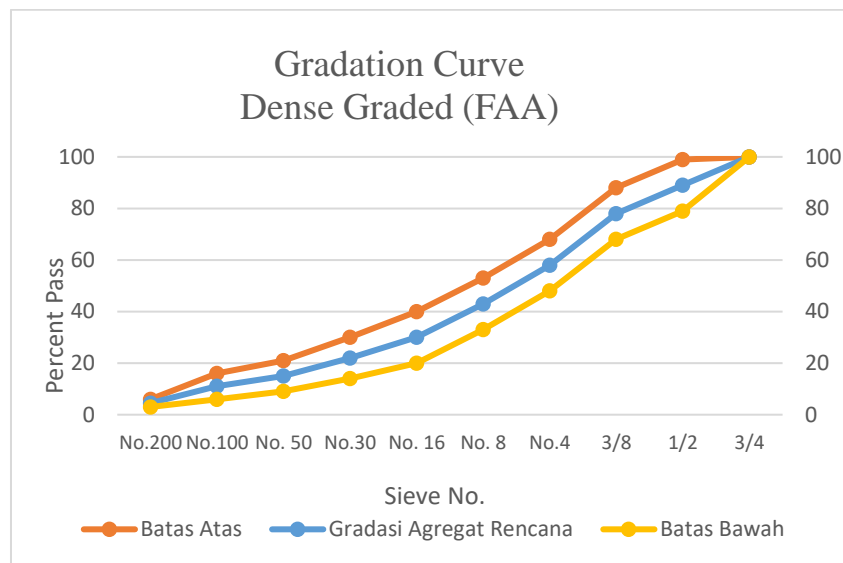
Sumber: BBA (Hakim, 2017)

Tabel 2.2 Spesifikasi Gradasi Agregat Untuk Bandara

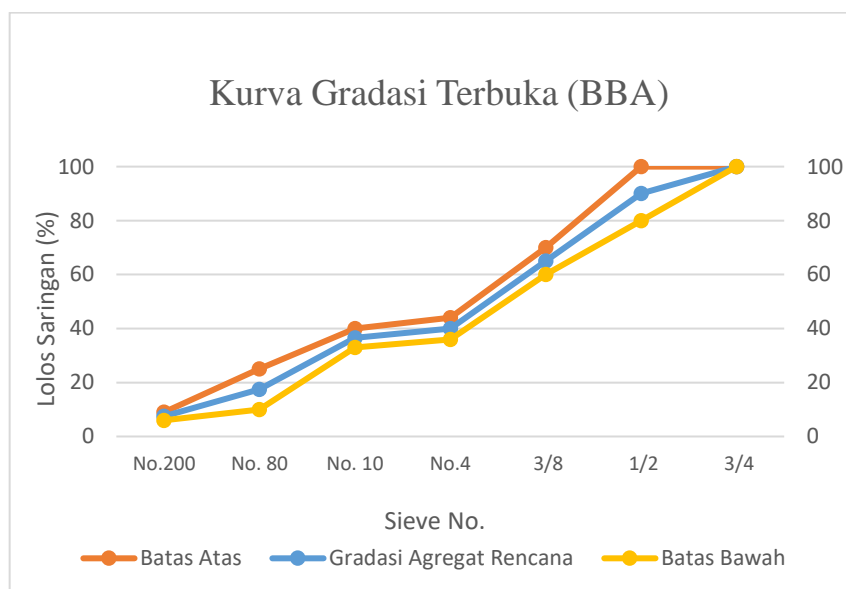
Nomor Saringan	Ukuran saringan (mm)	% Berat Lolos Saringan AC Standar FAA
1"	25,4 mm	-
3/4"	19,1 mm	100
1/2"	12,7 mm	79 - 99
3/8"	9,25 mm	68 - 88
no. 4	4,76 mm	48 - 68
no. 8	2,38 mm	33 - 53
no. 16	1,18 mm	20 - 40
no. 30	0,59 mm	14 - 30
no. 50	0,27 mm	9 - 21
no. 100	0,149 mm	6 - 16
no. 200	0,074 mm	3 - 6

Sumber: FAA (2014)

Untuk memudahkan dalam melihat prosentase nilai berat tertahan pada syarat spesifikasi akan digambarkan dalam grafik yang dapat dilihat pada Gambar 2.2 dan Gambar 2.3. Gradasi agregat rencana dalam persentase saringan tertahan tidak boleh melebihi batas atas maupun batas bawah dari spesifikasi gradasi yang digunakan. Gradasi rapat yang disajikan sebagai contoh disini adalah gradasi menurut spesifikasi *Federal Aviation Administration* (FAA) karena penelitian ini dimaksudkan untuk material perkerasan landasan pacu.



Gambar 2.2 Grafik yang menunjukkan gradasi rapat spesifikasi FAA (2014)



Gambar 2.3 Grafik yang menunjukkan gradasi terbuka spesifikasi BBA (2017)

2.4 Geopolimer

Geopolimer merupakan material baru dari jenis polimer anorganik yaitu polimer yang terbentuk dari buatan manusia. Geopolimer terbentuk karena adanya reaksi secara geokimia dengan menggunakan bahan dasar mineral aluminium silikat dan alkali. Davidovits (1975) menemukan bahwa cairan alkali bisa digunakan untuk mereaksikan silikon (Si) dan aluminium (Al) untuk menghasilkan binder.

Sekitar 20 tahun yang lalu, seorang peneliti bernama Prof. Joseph Davidovits menciptakan geopolimer untuk membuat binder atau pengikat karena reaksi kimia akibat adanya proses polimerisasi yang terjadi di dalam geopolimer meliputi reaksi kimia yang terjadi antara alkali dengan mineral Si – Al sehingga menghasilkan rantai polimerik tiga – dimensi dan ikatan struktur Si – O – Al – O yang konsisten. (Davidovits, 1999).

2.4.1 Penggunaan Geopolimer

Sifat geopolimer tengah dikembangkan di banyak bidang ilmiah dan industri seperti kimia anorganik modern, kimia fisik, kimia koloid, mineralogi, geologi dan semua jenis teknologi rekayasa. Penggunaan geopolimer yang potensial seperti: bahan tahan api, semen dan beton, komposit berteknologi tinggi untuk interior pesawat, mobil dan arkeologi. (Davidovits, 2008).

Geopolimer memiliki potensi aplikasi yang luas, baik dalam bentuk murni maupun dengan tambahan penguat (*reinforced*). Secara umum aplikasi tersebut terbagi atas dua kategori, yaitu:

- 1) Produk struktural seperti bahan penguat dalam manufaktur, pengganti semen dan beton.
- 2) Teknologi immobilisasi (solidifikasi/stabilitas) untuk bahan kimia beracun, limbah industri dan bahan sisa radioaktif.

2.4.2 Material Penyusun Geopolimer

Abu terbang (*fly ash*) merupakan limbah sisa hasil pembakaran batu bara pada pembangkit listrik. Komponen abu terbang bervariasi tergantung pada sumber dan tampilan batu bara yang dibakar, namun semua abu terbang memiliki sejumlah besar kandungan silikon dioksida (SiO_2) dan kalsium oksida (CaO)

Fly ash sendiri tidak memiliki kemampuan mengikat, namun dengan kehadiran air dan ukuran partikelnya yang halus, oksida silika yang terkandung dalam *fly ash* akan bereaksi kimia dengan campuran *sodium silikat* (Na_2SiO_3) dan *natrium hidroksida* (NaOH) yang menghasilkan zat yang memiliki kemampuan mengikat. Geopolimer ini merupakan polimer *thermosetting*, yaitu polimer yang hanya sekali mengeras dan tidak dapat menjadi lunak kembali (Davidovits, 1999).

Pengaruh kehalusan, kemampuan kerja, pengembangan kekuatan dan pengeringan susut geopolimer di klasifikasikan menggunakan tiga bahan berbeda, yaitu *fly ash* kasar (CFA), *fly ash* medium (MFA) dan *fly ash* halus (FFA) (Chindaprasirt, 2012).

1) Abu Terbang (*Fly Ash*)

Fly ash merupakan material pozzolan yaitu mineral silikat dan alumina yang dapat bereaksi dengan kalsium hidroksida dan membentuk senyawa semen. *Fly ash* yang di produksi dari pembakaran ada dua jenis:

- *Fly ash* kelas F, yaitu material pozzolanic mengandung silika gelas dan alumina yang apabila di campur air akan bereaksi dengan kalsium membentuk senyawa semen.
- *Fly ash* kelas C, yaitu material pozzolanic dan bersifat self-cementing (kemampuan untuk mengeras dan mencapai kekerasan) apabila dicampur dengan air.

Fly ash kelas F pada umumnya memiliki kandungan kalsium dan magnesium oksida yang lebih tinggi, kandungan silika, besi oksida dan karbon yang lebih rendah dibandingkan dengan *fly ash* kelas C.

2) Aktivator

Aktivator yang digunakan untuk membuat geopolimer adalah kombinasi antara Sodium Hidroksida dengan Sodium Silikat (Na_2SiO_3). (Davidovits, 1999). Sodium silikat berfungsi untuk mempercepat reaksi polimerisasi, sedangkan sodium hidroksida berfungsi untuk mereaksikan unsur-unsur Al dan Si yang terkandung dalam *fly ash* sehingga dapat menghasilkan ikatan polimer yang kuat.

Molaritas NaOH sangat berpengaruh pada kuat mekanik binder maupun beton geopolimer, dimana semakin tinggi molaritas NaOH semakin tinggi kuat mekanik beton maupun binder geopolimer. Selain itu perbandingan rasio activator (bahan tambahan yang mampu meningkatkan penguraian mikrobiologis dalam tumpukkan bahan organik) antara Na_2SiO_3 dan NaOH juga memberi pengaruh terhadap beton maupun binder geopolimer. Namun semakin tinggi perbandingan rasio antara Na_2SiO_3 dan NaOH tidak selalu menghasilkan kuat tekan yang tinggi (Ekaputri & Triwulan, 2013).

2.4.3 Proporsi Campuran Geopolimer

Karyawan, dkk (2017) melakukan penelitian mengenai penggunaan fly ash sebagai geopolimer untuk pengganti agregat dalam campuran aspal beton. Penelitian tersebut bertujuan untuk mengetahui potensi penggunaan fly ash limbah sisa pembakaran untuk campuran pembuatan agregat buatan geopolimer. Untuk agregat geopolimer tersusun atas *fly ash* dan aktivator yang dicampur menjadi satu sampai umur 28 hari. Aktivator yang digunakan adalah sodium silikat (Na_2SiO_3) dan natrium hidroksida (NaOH) dengan konsentrasi sebanyak 8M dan komposisi fly ash dan alkali sebesar 75%:25%.

Kesimpulan dari hasil penelitian tersebut adalah bahwa agregat buatan tersebut berpotensi untuk digunakan sebagai material agregat buatan untuk mengganti agregat alami pada campuran aspal beton. Kuat tekan dari pasta fly ash geopolimer dapat ditingkatkan dengan memodifikasi rasio alkali aktifator, yaitu Na_2SiO_3 , NaOH , dan Molaritas dari NaOH .

2.5 Pengujian *Indirect Tensile Strength*

Menurut *British Standard Institution* (1993), *Indirect tensile strength* (ITS) adalah kemampuan lapis perkerasan menahan kuat tarik yang disebabkan oleh beban kendaraan. Prediksi yang akurat terhadap respon dan performa perkerasan membutuhkan model teoritis yang mewakili kondisi struktur perkerasan dan masing-masing material dalam campurannya. Dalam perancangan campuran dengan metode *Marshall*, tidak ada pengujian kekuatan yang final.

Tensile Strength Test adalah suatu metode untuk mengetahui nilai gaya tarik dari campuran aspal. Gaya tarik terkadang digunakan untuk mengevaluasi potensi retakan (*cracking*) pada campuran aspal. Sifat uji ini adalah kegagalan gaya tarik yang berguna untuk memperkirakan potensial retakan. Rustanto (2007) mengatakan campuran penyusun lapisan perkerasan yang baik dapat menahan beban maksimum, sehingga dapat mencegah terjadinya retakan.

Tes ITS (*Indirect Tensile Strength*) memberikan dua sifat yang berguna untuk mengetahui karakter campuran aspal. Pertama adalah untuk mengevaluasi/memprediksi potensi retak campuran aspal dari nilai '*tensile strain at failure*'. Campuran yang runtuh pada regangan yang lebih besar, biasanya

memiliki ketahanan terhadap retak yang lebih. Yang kedua adalah mengevaluasi kekuatan tarik (*tensile strength*) yang sering dipakai untuk mengevaluasi ketahanan (*durability*) terhadap air (*water susceptibility*) dari campuran aspal (Suparma, 2001)

Uji kuat Tarik tidak langsung dilakukan dengan membebani benda uji berbentuk silinder dengan beban tunggal atau beban berulang yang bekerja paralel sepanjang tegak lurus bidang diameter benda uji (Roberts, et.al, 1991 dalam Vinola, 2010). Konfigurasi pembebanan ini menghasilkan tegangan Tarik yang relatif seragam pada arah tegak lurus beban dan sepanjang beban vertikal diameter, dengan batas puncaknya adalah terjadinya runtuh pada benda uji sepanjang bidang vertikal diameter. Beban yang diberikan pada uji kuat Tarik tidak langsung ini berupa beban strip (*Loading Strip*) dari bahan baja selebar 12,7 mm (0,5 in).

Pengujian ini dihitung dengan menggunakan Persamaan 2 dan persamaan 3 dan set up parameters sesuai ketentuan dalam British Standard (BS EN 12607–26:2012) dan pembebanan diilustrasikan dalam Gambar 2.4.

$$E = \frac{F \times (v + 0,27)}{(z \times h)} \quad (2.2)$$

$$E' = E \times (1 - 0,322 \times (\log(E) - 1,82 \times (0,60 - k))) \quad (2.3)$$

Dengan:

E = nilai ITS dalam MPa

F = beban vertikal puncak dalam Newton (N)

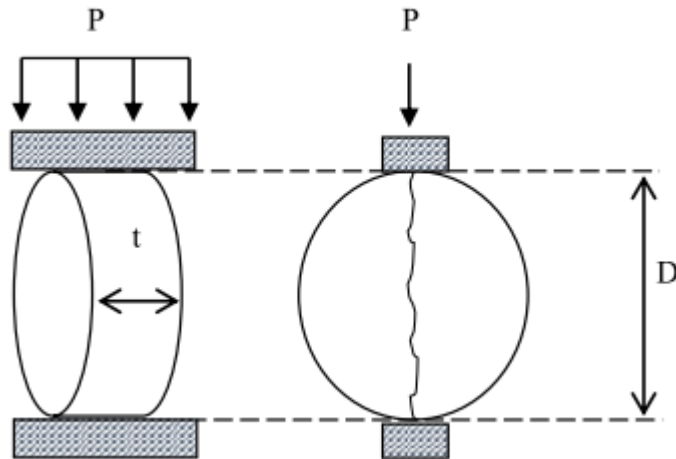
z = deformasi horizontal (mm)

v = *poisson's ratio* (0.35)

h = tebal sampel (mm)

E' = nilai ITS dalam Mpa, yang sudah disesuaikan dengan load faktor 0,60

k = faktor *load area*.



Gambar 2.4 Ilustrasi pembebanan pada ITS (*Indirect Tensile Strength*)

(Tajudin & Suparma, 2017)

Dari nilai ITS pada masing-masing perendaman kemudian digunakan untuk mengetahui Tensile Strength Ratio (TSR) atau indeks kuat tarik tidak langsung yang dihasilkan dari variasi perendaman. Nilai TSR didapat melalui Persamaan 3. *Asphalt Institute* mensyaratkan nilai TSR harus lebih besar dari 80%.

Jika nilai TSR yang kurang dari 80% mengindikasikan bahwa campuran rentan terhadap kerusakan yang disebabkan oleh air, sedangkan nilai TSR yang lebih dari 80% mengindikasikan bahwa campuran tahan terhadap kerusakan yang disebabkan oleh air (Tajudin & Suparma, 2017).

$$TSR = \frac{S1}{S2} \times 100 \quad (2.4)$$

Dengan:

TSR = indeks kuat tarik tidak langsung.

S1 = kekuatan tarik dari contoh uji kering.

S2 = kekuatan tarik dari contoh uji yang telah dikondisikan.

Berdasarkan standar spesifikasi FAA (2009) karakteristik modulus kekakuan yaitu minimal sebesar 1380 Mpa.

Atmodjo et al., (2013), melakukan penelitian yang berjudul “Kontribusi Aspal Buton Dalam Perubahan Karakteristik Modulus Resilient” melakukan penelitian tentang penggunaan Buton *Natural Asphalt* (BNA) yang ditambahkan

pada *Asphalt Concrete Wearing Coarse* (AC-WC) dengan jenis aspal pen 60/70. Pengujian Umatta dilakukan pada temperatur chamber 27°C , 30°C, 40°C, 50°C. Dan hasilnya menunjukan nilai modulus sebesar 1036,00 MPa – 2014,79 MPa.

Harmein Rahman et al., (2012), melakukan penelitian tentang pengaruh gradasi pada campuran *Split Mastic Asphalt* (SMA) yang menggunakan aditif asbuton murni untuk perkerasan bandara. Penelitian ini didapatkan 2 jenis campuran yang mempunyai nilai memenuhi standar yang ditetapkan oleh FAA 2009 yaitu minimal sebesar 1380 MPa. Campuran yang memenuhi standar tersebut adalah gradasi D5 ASBUTON 6% dengan nilai kekakuan sebesar 1511,50 MPa dan campuran gradasi D12 ASBUTON 6% dengan nilai 1418,50 MPa.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Rancangan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk memanfaatkan material *fly ash* yang melimpah dengan cara membuat agregat buatan berbahan geopolymer sebagai pengganti agregat alami.

Secara garis besar bab ini akan menjelaskan metode yang digunakan dalam pelaksanaan penelitian. Terdapat tiga langkah untuk mendapatkan hasil yang optimal, yaitu studi literatur, pembuatan geopolymer dan benda uji serta pengujiannya di laboratorium dan analisis data.

Dari hasil penelitian ini diharapkan kinerja aspal beton dengan penambahan agregat buatan berbahan geopolimer dapat diterapkan pada perkerasan. Penjelasan rancangan penelitian akan dijelaskan secara detail sebagai berikut.

3.2 Studi Literatur

Studi literatur berfungsi sebagai langkah awal untuk memahami prosedur penelitian, penggunaan material yang dibutuhkan, dan langkah dalam menganalisis data hasil penelitian. Studi literatur dilakukan sepanjang penelitian dilaksanakan. Hal ini bertujuan untuk mendukung kegiatan praktikum dan analisis penelitian dengan baik dan benar. Pada penelitian ini studi literatur meliputi formulasi proporsi bahan campuran agregat buatan, metode pengujian *marshall*, metode pengujian *Indirect Tensile Strength*, serta penggunaan gradasi terbaik untuk campuran perkerasan bandara.

3.3 Proses Penelitian di Laboratorium

3.3.1 Pembuatan Agregat Buatan Berbahan *Fly Ash* Geopolimer

Agregat Buatan diolah menggunakan mesin granulator dengan bahan campuran *fly ash* dan alkali aktivator campuran sodium hidroksida (NaOH) dan sodium silikat (Na_2SiO_3). Langkah-langkah pengolahan agregat buatan mengikuti penelitian yang telah ada (Yuliana et al., 2018).

Campuran agregat buatan geopolimer dibuat dengan menggunakan mesin granulator yang terdiri dari pan granulator dengan sudut kemiringan 50° yang dapat berputar yang digerakkan dengan mesin listrik. Kecepatan putar pan granulator ini berkisar 26 putaran per menit dengan diameter pan 120 cm dan berbobot sekitar 200-250 kg. Mesin granulator dapat dilihat pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Mesin Granulator

Pada penelitian ini komposisi *fly ash* dan alkali aktivator yang digunakan adalah komposisi terbaik dari penelitian yang telah dilakukan sebelumnya. Komposisi campuran yang digunakan yaitu perbandingan *fly ash* dan alkali aktivator sebesar 75%:25% dengan rasio aktifator 1:2,5 (Yuliana et al., 2018).

Pada bagian ini akan diuraikan perhitungan jumlah berat material yang dibutuhkan oleh benda uji campuran aspal beton *fly ash* geopolimer untuk pengujian *marshall*, perendaman, dan pengujian ITS pada Tabel 3.1 dan Tabel 3.2.

Tabel 3.1 Perhitungan berat material yang dibutuhkan pada gradasi rapat

Kebutuhan agregat buatan pada Gradasi Rapat/dense graded												
No. Ayakan		batas bawah (%)	Batas Tengah (%)	Batas Atas (%)	Tertahan pd masing-masing saringan (%)		Rasio 25% : 75%		Total Kebutuhan Ag. Buatan		Total Kebutuhan Ag. Alam	
							Ag. Buatan	Ag. Alam	1 buah	27 buah	1 buah	27 buah
in	mm				(%)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)
3/4	19	100	100	100	0	0	0	0	0	0	0	0
1/2	12.5	79	89	99	11	132	33	99	33	891	99	2673
3/8	9.5	68	78	88	11	132	33	99	33	891	99	2673
No.4	4.75	48	58	68	20	240	60	180	60	1620	180	4860
No.8	2.38	33	43	53	15	180	45	135	45	1215	135	3645
No.16	1.18	20	30	40	13	156		156			156	4212
No.30	0.59	14	22	30	8	96		96			96	2592
No. 50	0.27	9	15	21	7	84		84			84	2268
No.100	0.149	6	11	16	4	48		48			48	1296
No.200	0.074	3	4.5	6	6.5	78		78			78	2106
Pan					4.5	54		54			54	1458
Jumlah					100	1200	171	1029	171	4617	1029	27783

Berdasarkan Tabel 3.1 didapat kebutuhan agregat dengan perhitungan sebagai berikut :

Agregat Buatan : $171 \text{ gr} \times 27 \text{ benda uji} = 4617 \text{ gr} \approx 4,6 \text{ kg}$

Agregat Alami : $1029 \text{ gr} \times 27 \text{ benda uji} = 27783 \text{ gr} \approx 27,7 \text{ kg}$

Tabel 3.2 Perhitungan berat material yang dibutuhkan pada gradasi terbuka

Kebutuhan agregat buatan pada Gradasi terbuka/ <i>open graded</i>												
No. Ayakan		batas bawah (%)	Batas Tengah (%)	Batas Atas (%)	Tertahan pd masing masing saringan		Rasio 25% : 75%		Total Kebutuhan		Total Kebutuhan	
in	mm				(%)	(gr)	Ag. Buatan	Ag. Alam	1 buah	27 buah	1 buah	27 buah
3/4	19	100	100	100	0	0	0	0	0	0	0	0
1/2	12.5	80	90	100	10	120	30	90	30	810	90	2430
3/8	9	60	65	70	25	300	75	225	75	2025	225	6075
No.4	4.75	36	40	44	25	300	75	225	75	2025	225	6075
No. 10	2	33	36.5	40	3.5	42		42			42	1134
No.40	0.425	0	0	0	0	0		0			0	0
No. 80	0.268	10	17.5	25	19	228		228			228	6156
No.200	0.074	6	7.5	9	10	120		120			120	3240
Pan					7.5	90		90			90	2430
Jumlah					100	1200	180	1020	180	4860	1020	27540

Berdasarkan Tabel 3.2 didapat kebutuhan agregat dengan perhitungan sebagai berikut :

Agregat Buatan : $180 \text{ gr} \times 27 \text{ benda uji} = 4860 \text{ gr} \approx 4,8 \text{ kg}$

Agregat Alami : $1020 \text{ gr} \times 27 \text{ benda uji} = 27540 \text{ gr} \approx 27,5 \text{ kg}$

Dari Tabel 3.1 dan Tabel 3.2 didapatkan total kebutuhan dari masing – masing agregat dengan perhitungan sebagai berikut :

Agregat Buatan : $4,617 \text{ kg} + 4,860 \text{ kg} = 9,477 \text{ kg} \approx 10 \text{ kg}$

Agregat Alami : $27,783 \text{ kg} + 27,540 \text{ kg} = 55,323 \text{ kg} \approx 56 \text{ kg}.$

3.3.2 Pengujian Material

Pengujian material yang dilaksanakan pada penelitian ini, meliputi pemeriksaan terhadap aspal penetrasi 60/70, pemeriksaan agregat kasar, agregat buatan, dan *filler*. Apabila material telah memenuhi spesifikasi yang ditetapkan, maka langkah selanjutnya adalah mendesain campuran aspal beton untuk dilakukan pengujian *Indirect Tensile Strenght*.

Dalam pemilihan bahan agregat diupayakan menjamin tingkat penyerapan air yang paling rendah. Hal itu merupakan antisipasi atas hilangnya material aspal yang terserap oleh agregat. Agregat dapat terdiri atas beberapa fraksi, misalnya fraksi kasar, fraksi medium dan abu batu atau pasir alam. Pada umumnya fraksi kasar dan fraksi medium digolongkan sebagai agregat kasar. Sedangkan untuk abu batu dan pasir alam sebagai agregat halus.

3.3.2.1 Pemeriksaan Aspal

Bahan aspal harus diekstraksi dari benda uji sesuai cara SNI 03 – 6894 – 2002. Setelah konsentrasi larutan aspal yang terekstraksi mencapai 200mm, partikel mineral yang terkandung harus dipindahkan ke dalam sentrifugal. Pemindahan ini dianggap memenuhi bilamana kadar abu dalam bahan aspal yang diperoleh kembali tidak melebihi 1 % (dengan pengapian). Bahan aspal harus diperoleh kembali dari larutan sesuai dengan prosedur SNI 03-4797-1988. Terdapat beberapa langkah pemeriksaan aspal dengan menggunakan spesifikasi/metode pengujian pada Tabel 3.3.

Tabel 3.3 Metode Pemeriksaan Aspal

No	Judul Pengujian	Spesifikasi/Metode Pengujian
1	Peneterasi	SNI-06-2456-1991
2	Titik Nyala dan Titik Bakar Aspal	SNI-06-2433-1991
3	Kehilangan berat aspal	SNI 06-2440-1991
4	Daktalitas	SNI-06-2432-1991
5	Berat Jenis Aspal	SNI 06-2441-1991
6	Titik Lembek Aspal dan Ter	SNI 06-2434-1991

3.3.2.2 Pemeriksaan Agregat Kasar

Terdapat beberapa parameter pengujian dalam pemeriksaan agregat kasar, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3.4.

Tabel 3.4 Metode Pemeriksaan Agregat Kasar

No	Judul Pengujian	Spesifikasi/Metode Pengujian
1	Berat jenis dan penyerapan agregat kasar	SNI 03-1969-1990
2	Analisa saringan agregat kasar	SNI 03-1968-1990
3	Keausan Agregat dengan mesin Abrasi	SNI 03-2417-1991
4	Kelekatan agregat terhadap aspal	SNI 03-1969-1990
5	Kepipihan dan kelonjongan agregat	ASTM D4791
6	Titik Lembek Aspal dan Ter	SNI 06-2434-1991

3.3.2.3 Pemeriksaan Agregat Buatan

Ada beberapa parameter pengujian dalam pemeriksaan agregat buatan, yang ditunjukkan pada Tabel 3.5.

Tabel 3.5 Metode Pemeriksaan Agregat Buatan

No	Judul Pengujian	Spesifikasi/Metode Pengujian
1	Berat jenis dan penyerapan agregat kasar	SNI 03-1969-1990
2	Analisa saringan agregat kasar	SNI 03-1968-1990
3	Keausan Agregat dengan mesin Abrasi	SNI 03-2417-1991
4	Kelekatan agregat terhadap aspal	SNI 03-1969-1990

3.3.2.4 Pemeriksaan Bahan Pengisi (*Filler*)

Bahan pengisi harus bebas dari bahan yang tidak dikehendaki. Bahan pengisi yang ditambahkan harus kering dan bebas dari gumpalan-gumpalan.

Pengujian bahan pengisi meliputi Analisa saringan atau pengujian jumlah bahan dalam agregat yang lolos saringan no. 200 (0,075 mm) yaitu banyaknya bahan yang lolos saringan tersebut sesudah agregat dicuci sampai air cucian menjadi jernih.

Tujuan metode ini adalah untuk memperoleh persentase jumlah bahan dalam agregat yang lolos saringan Nomor 200 (0,075 mm), sehingga berguna bagi perencanaan dan pelaksana pembangunan jalan. Parameter pengujian dalam pemeriksaan *filler* akan dijelaskan dalam Tabel 3.6.

Tabel 3.6 Metode Pemeriksaan Bahan Pengisi (*filler*)

No	Judul Pengujian	Spesifikasi/Metode Pengujian
1	Berat jenis dan penyerapan agregat halus	SNI 15-2351-1991
2	Analisa saringan agregat halus	SNI 03-1968-1990

3.3.3 Mix Desain Campuran Aspal Beton

Mix desain campuran aspal beton dibuat dengan mengikuti spesifikasi gradasi FAA dan BBA dimana campuran yang digunakan adalah agregat kasar yang dicampur dengan agregat buatan, agregat halus, *filler*, serta aspal dengan penetrasi 60/70.

1. Pemilihan gradasi agregat

Setelah melakukan pengujian terhadap material yang akan digunakan, maka selanjutnya dilakukan penyiapan campuran agregat sesuai dengan persyaratan gradasi. Pada penelitian ini dilakukan pengujian terhadap campuran agregat buatan dengan 2 jenis gradasi yaitu gradasi rapat dan gradasi terbuka. Gradasi yang

digunakan adalah pada batas tengah dari masing – masing gradasi. Gradasi agregat yang digunakan dalam penelitian ditunjukkan pada Tabel 3.7.

Tabel 3.7 Gradasi Agregat yang Digunakan

Kebutuhan agregat buatan pada Gradasi Rapat/ <i>dense graded</i>							Kebutuhan agregat buatan pada Gradasi terbuka/ <i>open graded</i>						
No. Ayakan		batas bawah (%)	Batas Tengah (%)	Batas Atas (%)	Tertahan pd masing-masing saringan (%)		No. Ayakan		batas bawah (%)	Batas Tengah (%)	Batas Atas (%)	Tertahan pd masing-masing saringan	
in	mm				(%)	(gr)	in	mm				(%)	(gr)
3/4	19	100	100	100	0	0	3/4	19	100	100	100	0	0
1/2	12.5	79	89	99	11	132	1/2	12.5	80	90	100	10	120
3/8	9.5	68	78	88	11	132	3/8	9	60	65	70	25	300
No.4	4.75	48	58	68	20	240	No.4	4.75	36	40	44	25	300
No.8	2.38	33	43	53	15	180	No. 10	2	33	36.5	40	3.5	42
No.16	1.18	20	30	40	13	156	No. 80	0.268	10	17.5	25	19	228
No.30	0.59	14	22	30	8	96	No.200	0.074	6	7.5	9	10	120
No. 50	0.27	9	15	21	7	84	Pan					7.5	90
No.100	0.149	6	11	16	4	48	Jumlah					100	1200
No.200	0.074	3	4.5	6	6.5	78							
Pan					4.5	54							
Jumlah					100	1200							

2. Penentuan Kadar Aspal Optimum

Variasi kadar aspal ditentukan berdasarkan pada kadar aspal awal perkiraan yang merupakan kadar aspal tengah/ideal. Kadar aspal tengah dihitung berdasarkan persamaan:

$$P_b = 0,035 (\%CA) + 0,045(\%FA) + 0,18 (\%Filler) + \text{Konstanta} \quad (3.1)$$

Keterangan:

P_b = kadar aspal perkiraan, persen terhadap berat campuran;

CA = persen agregat tertahan saringan No. 8;

FA = agregat halus lolos saringan No. 8 dan tertahan No. 200;

Filler = agregat minimal 75% lolos saringan No. 200;

Nilai konstanta sekitar 0,5 – 1,0 untuk AC

Kadar aspal tengah yang diperoleh dari rumus tersebut dibulatkan mendekati angka 0,5% terdekat. Variasi yang digunakan sebanyak 5 variasi kadar aspal yang masing-masing berbeda 0,5%. Variasi kadar aspal yang dipilih sedemikian rupa, sehingga dua kadar aspal kurang dari nilai kadar aspal tengah, dan dua kadar aspal lainnya lebih besar dari nilai kadar aspal tengah. Jika kadar aspal tengah/ideal adalah P_b %, maka variasi kadar aspal adalah $(P_b - 1)$ %, $(P_b - 0,5)$ %, P_b %, $(P_b + 0,5)$ %, dan $(P_b + 1)$ % masing – masing 3 benda uji.

3.3.4 Pembuatan Benda Uji Campuran Aspal Beton

Setelah agregat buatan dan matrial lainnya telah siap digunakan, maka selanjutnya adalah membuat benda uji campuran aspal beton dengan penambahan agregat buatan geopolimer untuk menentukan kadar aspal optimum dengan metode

marshall dan pengujian perendaman. Metode yang digunakan untuk pembuatan aspal beton geopolimer akan mengikuti tahapan pelaksanaan metode *marshall* SNI-06-2489-1991. Untuk pengujian *Indirect Tensile Strenght*. Metode yang digunakan untuk pembuatan aspal beton geopolimer akan mengikuti tahap-tahap pengujian ITS dilakukan sesuai (Badan Standardisasi Nasional, 2015).

3.3.4.1 Pengujian *Marshall*

Pemeriksaan terhadap campuran dilakukan dengan *Marshall Test* yang bertujuan untuk menentukan ketahanan (*stability*) dan kelelahan (*flow*) dari campuran aspal dan agregat dan menentukan kadar aspal optimum untuk pengujian setelahnya. Metode yang digunakan untuk pembuatan aspal beton geopolimer akan mengikuti tahapan pelaksanaan metode *marshall* (SNI-06-2489-1991) atau AASTHO T 245-90, atau ASTM D 1559-76).

Benda uji yang digunakan adalah benda uji standar berbentuk tabung dengan diameter 101,6 mm (4 inch) dan tinggi 63,5 mm (2,5 inch). Pemadatan untuk uji *Marshall* dilakukan dengan penumbukan sebanyak 75 kali per bidang dengan menggunakan penumbuk. Setelah benda uji dipadatkan, kemudian disimpan pada suhu ruang selama 24 jam, selanjutnya benda uji ditimbang di udara, di dalam air dan dalam kondisi kering-permukaan jenuh (*Saturated Surface Dry, SSD*) untuk mendapatkan berat jenis *bulk* (*Bulk Specific Gravity*). Selanjutnya direndam pada temperatur 60°C selama 30 menit dan siap untuk pengujian stabilitas dan *flow*.

Tabel 3.8 Kebutuhan benda uji untuk pengujian *marshall*

Kadar Aspal	Jumlah Benda Uji	
	Gradasi Rapat	Gradasi Terbuka
Pb – 1,0	3	3
Pb – 0,5	3	3
Pb	3	3
Pb + 0,5	3	3
Pb + 1	3	3
Jumlah Benda Uji Masing-masing Campuran	15	15
Total Benda Uji	30	

Benda uji dipersiapkan dengan menggunakan prosedur tertentu baik untuk pemanasan, pencampuran maupun untuk pemadatan campuran aspal. Stabilitas benda uji adalah kemampuan maksimum benda uji yang dihasilkan pada suhu 60°

dan diuji dengan alat tertentu. Nilai *flow* adalah pergerakan total atau regangan yang terjadi dalam benda uji antara kondisi tanpa beban dan beban maksimum selama pengujian stabilitas (*Asphalt Institute*, 1993). Kebutuhan benda uji campuran aspal beton akan diuraikan pada Tabel 3.8. Untuk kriteria perencanaan pada pengujian *marshall* ditunjukkan pada Tabel 3.9.

Tabel 3.9 Kriteria perencanaan untuk Pengujian *Marshall*

test property	units	Desain perkerasan untuk berat pesawat (<i>gross weights</i>) ≥ 60.000 Lbs (≥ 27216 kg) dan <i>Tire pressures</i> ≥ 100 psi
number of blows	-	75*
Stability	pounds (newtons)	2150 (9560)*/2200**
Flow	0.01 inch (0.25mm)	2.5-4*/2-4**
Void in total mix	%	3.5*/3-4**
Void in mineral aggregate (minumum)	%	15*/3-4**
Void fillet with bitumen	%	76-82**
Void Mix in Aspal		15**
Density standart min.	gr/cm ²	2.30**

Sumber: *) Federal Aviation Administration (2014)

**)Peraturan Direktur Jenderal Perhubungan Udara

3.3.4.2 Pengujian Perendaman

Pengujian perendaman *Marshall* ini dilakukan untuk melihat ketahanan campuran terhadap pengaruh kerusakan oleh air. Air pada campuran beraspal dapat mengakibatkan berkurangnya daya lekat aspal terhadap agregat, sehingga dapat melemahkan ikatan antar agregat. Hasil yang berbeda pada masing-masing jenis campuran akan sifat stabilitas *Marshall* dapat dibaca pada indeks stabilitas sisa dimana stabilitas sebelum direndam dibandingkan dengan stabilitas yang direndam selama 24 jam.

Pengujian tersebut adalah uji durabilitas standar yang di lakukan di dalam *waterbath* dengan kondisi temperatur $60 \pm 1^\circ\text{C}$. Sebenarnya kondisi seluruh benda uji baik yang kering maupun basah tetap direndam dalam *waterbath*. Hanya saja benda uji yang kering hanya direndam selama 30 ± 1 menit untuk memastikan benda uji tersebut dalam keadaan hampa udara, sedangkan benda uji basah direndam selama 24 ± 1 jam agar benar-benar dalam kondisi jenuh air dan panas seperti kondisi di lapangan.

Uji perendaman terdiri dari 3 sampel yang direndam pada bak perendaman untuk semua sampel kadar aspal optimum. Spesifikasi Departemen Permukiman dan Prasarana Wilayah untuk mengevaluasi keawetan campuran adalah pengujian *Marshall* perendaman di dalam air pada suhu 60°C selama 24 jam. Kebutuhan benda uji campuran aspal beton akan diuraikan pada Tabel 3.10.

Tabel 3.10 Kebutuhan benda uji untuk pengujian perendaman

Pengujian	Jumlah Benda Uji	
	Gradasi Rapat	Gradasi Terbuka
Direndam air suhu 60°C selama 24 jam	3	3
<i>Marshall</i> Standar	3	3
Total Benda Uji	12	

Perbandingan stabilitas yang direndam dengan stabilitas standar, dinyatakan sebagai persen, dan disebut Indeks Stabilitas Sisa (IRS), dan dihitung sebagai berikut:

$$IRS = (MSi/MSs) \times 100\% \quad (3.2)$$

Keterangan:

IRS : Indeks Kekuatan Sisa (*Index of Retained Strength*) (%).

MSi : Stabilitas *Marshall* setelah perendaman 24 jam pada suhu 60±1°C (kg)

MSs : Stabilitas *Marshall* standar perendaman selama 30±1 menit suhu 60°C (kg)

3.3.4.3 Pengujian ITS (*Indirect Tensile Strenght*)

Persiapan benda uji untuk pengujian ITS (*Indirect Tensile Strenght*) terdiri atas agregat kasar, agregat buatan dengan geopolimer dan filler pada KAO yang didapatkan dari hasil pengujian *marshall* pada penelitian yang telah ada, kemudian dilakukan tahap pencampuran dan pemadatan. Untuk kebutuhan benda uji yang digunakan pada pengujian ITS dapat dilihat pada Tabel 3.11.

Tabel 3.11 Kebutuhan benda uji untuk pengujian ITS

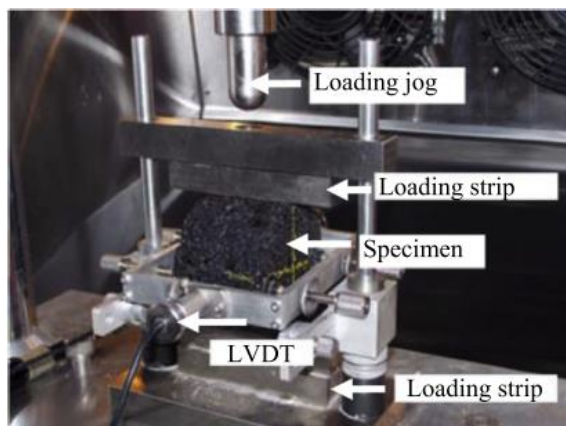
Gradasi	Uji <i>unconditioned</i> 20°C	Uji <i>conditioned</i>		Jumlah Benda Uji
		Lama Perendaman		
		30 menit	1 hari	
BBA	3	2	2	7 buah

Pada penelitian ini dilakukan pengujian terhadap campuran agregat buatan dengan 2 variasi suhu dan lama perendaman. Gradasi campuran benda uji yang akan

dilakukan pengujian hanya pada campuran bergradasi terbuka (BBA). Benda uji berbentuk silinder dengan ukuran diameter 100 mm, tebal $(63,5 \pm 2,5)$ mm.

Metode yang digunakan untuk pengujian aspal beton geopolimer akan mengikuti tahap-tahap pengujian ITS seperti berikut:

- a) Benda uji yang telah diberi tanda setelah proses pemadatan didiamkan selama ± 24 jam, kemudian dibersihkan dari kotoran yang menempel.
 - b) Benda uji diukur tingginya dan ditimbang dalam keadaan kering untuk mengetahui berat keringnya.
 - c) Untuk benda uji *unconditioned*, benda uji terlebih dahulu didiamkan pada suhu 20°C selama ± 30 menit.
 - d) Untuk benda uji *conditioned* benda uji terlebih dahulu direndam dalam *waterbath* dengan suhu $(60 \pm 1)^{\circ}\text{C}$ selama 1 hari. Setelah direndam benda uji kemudian didiamkan dalam suhu ruang 25°C selama ± 24 jam,
 - e) Benda uji yang telah melalui proses persiapan kemudian diletakkan diantara plat beban uji dengan posisi ditengah pada temperatur 20°C .
 - f) Mesin penguji dinyalakan, lalu grafik hasil pengujian akan terlihat dilayar.
- Alat yang digunakan dan konfigurasi benda uji pada pengujian ITS ditunjukkan seperti pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Alat dan Benda Uji ITS (Karami, 2018)

3.3.5 Rekapitulasi Jumlah kebutuhan Benda Uji

Setelah ditetapkan jumlah benda uji untuk setiap masing-masing pengujian, maka dihitung jumlah keseluruhannya. Jumlah total kebutuhan benda uji pada penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 3.12.

Tabel 3.12 Rekapitulasi Jumlah Kebutuhan Benda Uji

No.	Jenis Pengujian	Kondisi Pengujian		Jumlah Benda Uji		Jumlah Benda Uji
				Gradasi Rapat	Gradasi Terbuka	
				(A1)	(A2)	
1	Pengujian Marshall	Kadar Aspal	Pb – 1,0	3	3	6
			Pb – 0,5	3	3	6
			Pb	3	3	6
			Pb + 0,5	3	3	6
			Pb + 1	3	3	6
3	Pengujian Perendaman	Suhu Perendaman Air	60° C (24jam)	3	3	6
			Marshall Standar	3	3	6
5	Pengujian ITS	Lama Waktu Perendaman	ITS Standar	-	3	3
			30 menit	-	2	2
			1 hari	-	2	2
Total Kebutuhan Benda Uji				21	28	49

3.4 Analisis Data

Analisis data hasil pengujian dilakukan untuk mengetahui kinerja campuran aspal beton pada agregat buatan *fly ash* dengan alkali aktivator pada gradasi FAA dan BBA dengan variasi suhu yang berbeda.

3.4.1 Analisis Material Agregat Buatan

Fly ash yang digunakan dalam penelitian ini didapatkan dari Paito Steam Power Plant, Probolinggo, Jawa timur dengan kategori fly ash kelas F. Sedangkan jenis aktivator yang digunakan yaitu Sodium Silikat (Na_2SiO_3) dan Sodium Hidroksida (NaOH). NaOH berupa serbuk dan akan dilarutkan dengan menggunakan aquades sehingga menjadi larutan NaOH dan digunakan larutan NaOH 8M. Kedua bahan campuran agregat buatan ini diolah dengan komposisi campuran dan spesifikasi properties yang telah didapatkan berdasarkan penelitian yang telah ada.

3.4.2 Analisis Agregat

Kebutuhan benda uji agregat terdiri dari agregat kasar, agregat buatan dan *filler*. Rincian kebutuhan benda uji tersebut sesuai dengan persentase gradasi pada spesifikasi gradasi FAA dan BBA. Analisis yang dilakukan dalam analisa agregat adalah sifat fisis agregat sesuai dengan spesifikasi Dirjen Perhubungan Udara.

3.4.3 Analisis Pengujian ITS

Sesuai dengan SNI 6753:2015, dan mempunyai nilai ITS memenuhi standar yang ditetapkan oleh FAA 2009 yaitu minimal sebesar 1380 Mpa maka analisis yang dilakukan yaitu:

- Menghitung kekuatan Tarik dengan rumus sebagai berikut:

$$E = \frac{F \times (v + 0,27)}{(z \times h)} \quad 3.3$$

$$E' = E \times (1 - 0,322 \times (\log(E) - 1,82 \times (0,60 - k))) \quad 3.4$$

Dengan:

E = nilai ITS dalam MPa

F = beban vertikal puncak dalam Newton (N)

z = deformasi horizontal (mm)

v = *poisson's ratio* (0.35)

h = tebal sampel (mm)

E' = nilai ITS dalam Mpa, yang sudah disesuaikan dengan load faktor 0,60

k = faktor *load area*.

- Menghitung rasio kekuatan Tarik (*Tensile Strenght Ratio*) dengan rumus sebagai berikut:

$$TSR = \frac{S1}{S2} \times 100 \quad 3.5$$

Dengan:

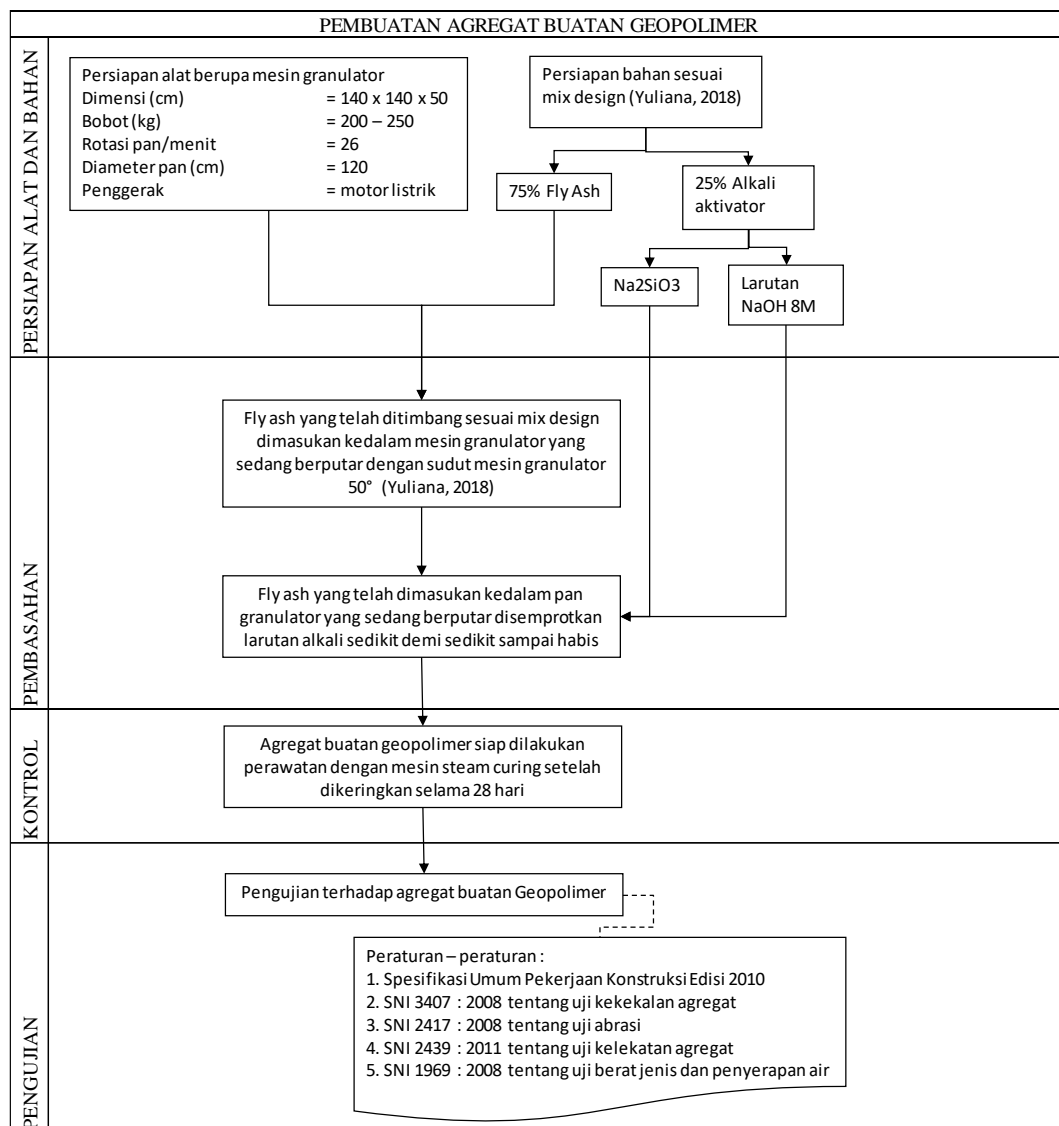
TSR = indeks kuat tarik tidak langsung.

S1 = kekuatan tarik dari contoh uji kering.

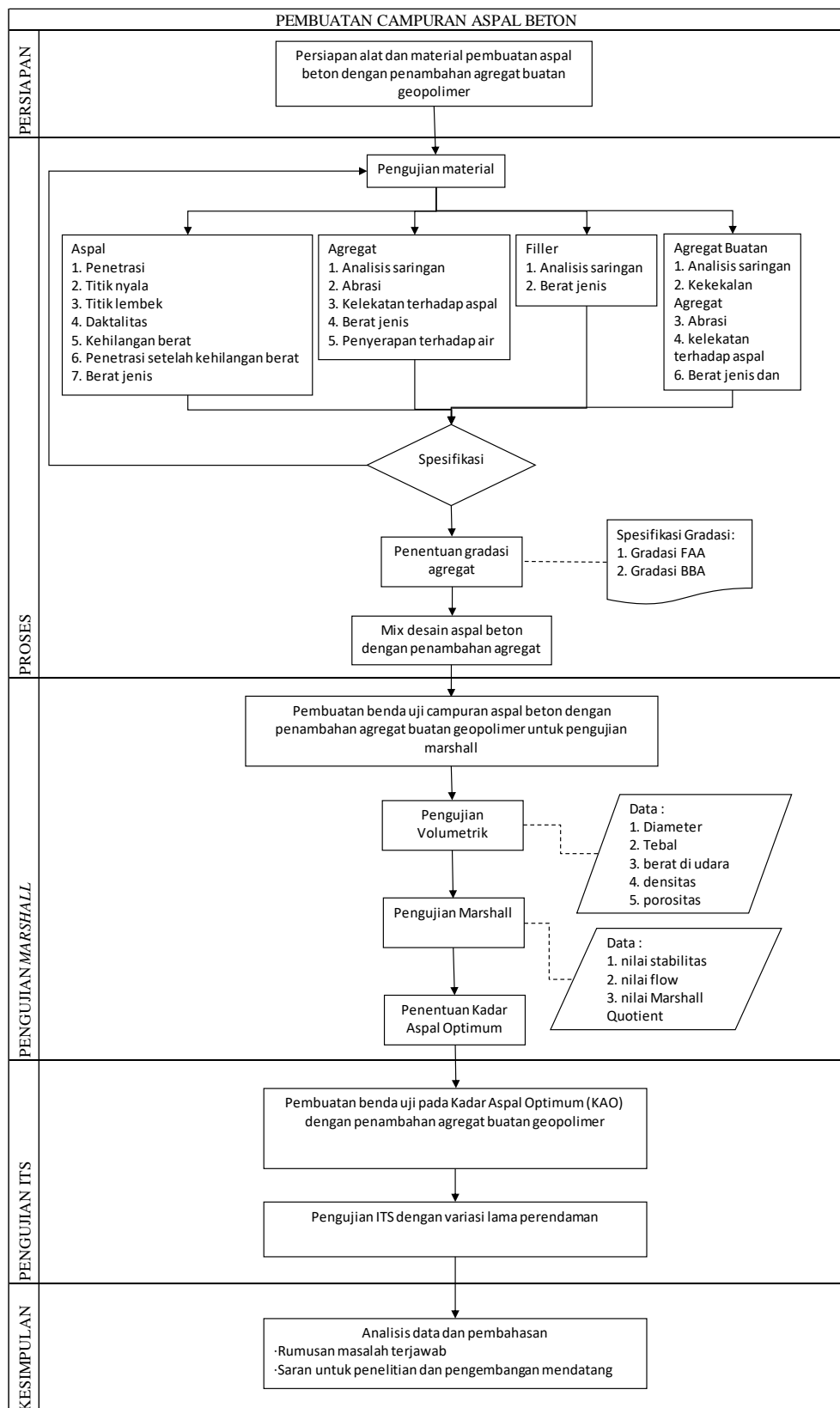
S2 = kekuatan tarik dari contoh uji yang telah dikondisikan.

3.5 Tahapan Penelitian

Ada 2 tahapan yang akan dilakukan untuk menyelesaikan penelitian ini seperti yang akan ditunjukkan pada Gambar 3.3 dan Gambar 3.4. Tahapan pertama adalah tahapan dalam pembuatan agregat buatan berbahan geopolimer dengan proses granulasi dan untuk tahapan kedua adalah tahapan dalam pembuatan campuran aspal beton dengan penggunaan agregat buatan geopolimer serta pengujian *Indirect Tensile Strenght*.



Gambar 3.3 Bagan Alir Pembuatan Agregat Buatan Geopolimer



Gambar 3.4 Bagan Alir Pembuatan Campuran Aspal dengan Penambahan agregat Geopolimer

BAB IV

DATA DAN ANALISIS PENELITIAN

4.1 Pengujian Material

Berdasarkan pengujian yang dilaksanakan di Laboratorium Perhubungan dan Bahan Konstruksi Jalan serta Laboratorium Struktur Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan dan Kebumihan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, didapatkan hasil pengujian material penyusun aspal beton sebagai berikut:

4.1.1 Aspal

Aspal yang digunakan dalam penelitian adalah aspal penetrasi 60/70 produksi PT. Pertamina. Aspal yang di uji diperlihatkan pada Gambar 4.1, sedangkan hasil pengujian aspal ditunjukkan dalam Tabel 4.1 dan detail perhitungannya dapat dilihat di lampiran A.



Gambar 4.1 Pengujian Aspal

Tabel 4.1 Hasil Pengujian Aspal

No.	Jenis Pengujian	Persyaratan	Hasil Pengujian
1	Penetrasi pada 25°C (0,1 mm)	60 – 70	64
2	Titik Lembek (°C)	≥ 48	51
3	Daktilitas pada 25°C (cm)	≥ 100	≥100
4	Titik Nyala (°C)	≥ 232	256
5	Berat Jenis	≥ 1,0	1,033

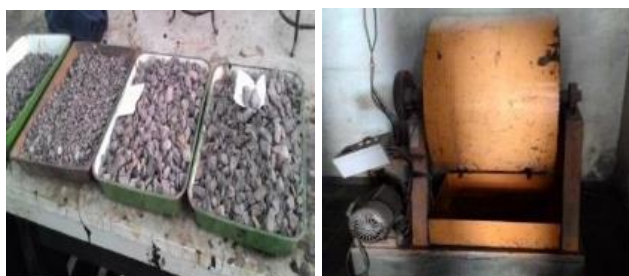
Tabel 4.1 diketahui bahwa pengujian aspal penetrasi 60/70 meliputi penetrasi, titik lembek, daktilitas, titik nyala dan berat jenis. Semua pengujian aspal penetrasi 60/70 dilaksanakan sebanyak dua kali, dan hasil pengujian pada Tabel 4.1

diatas merupakan reratanya. Hasil pengujian menunjukkan bahwa aspal penetrasi 60/70 sudah sesuai dengan spesifikasi yang telah ditentukan.

Aspal dalam campuran berfungsi merekat agregat-agregat satu sama lain sehingga membentuk kesatuan yang kokoh. Aspal dengan penetrasi rendah sangat sesuai untuk menunjang stabilitas dan kekakuan, yang berarti lebih mampu menahan lalu lintas berat. Sedangkan aspal dengan penetrasi tinggi memudahkan pelaksanaan, serta cocok untuk daerah dengan temperatur tidak terlalu panas, serta lalu lintas ringan sampai sedang. Aspal dengan titik lembek tinggi sangat sesuai untuk daerah tropis, sedangkan aspal dengan titik lembek rendah masih bisa digunakan pada daerah-daerah dingin seperti di pegunungan dan sebagainya.

4.1.2 Agregat Kasar

Agregat kasar yang di uji umumnya tertahan pada saringan No.8 atau saringan 2,36 mm. Agregat kasar merupakan batu pecah mesin dengan ukuran maksimum tertahan saringan $\frac{3}{4}$ ". Agregat kasar yang diuji diperlihatkan pada Gambar 4.2, sedangkan hasil pengujian agregat kasar ditunjukkan dalam Tabel 4.2 dan detail perhitungannya dapat dilihat di lampiran A.



Gambar 4.2 Agregat Kasar

Tabel 4.2 Hasil Pengujian Agregat Kasar

No	Pengujian	Persyaratan	Hasil Pengujian
Agregat Kasar			
1	Berat Jenis Bulk, gr/cm ³		2.542
	Berat Jenis Semu, gr/cm ³		2,703
2	Penyerapan Air, %	Maks. 3	2.349
3	Abrasi dengan Mesin Los Angeles, %	Maks. 40	30,8
4	Kelekatan agregat terhadap aspal, %	Min. 95	98

Tabel 4.2 menunjukkan bahwa pemeriksaan agregat kasar meliputi penyerapan air, berat jenis bulk, berat jenis *apparent*, abrasi, analisis saringan, kelekatan terhadap aspal, dan kekekalan agregat terhadap larutan Magnesium Sulfat. Semua pengujian agregat kasar dilaksanakan sebanyak dua kali, dan hasil pengujian pada Tabel 4.2 diatas merupakan hasil rata – ratanya. Hasil pengujian menunjukkan bahwa agregat kasar sudah sesuai dengan spesifikasi yang telah ditentukan.

4.1.3 Agregat Halus

Agregat halus yang di uji umumnya lolos saringan No.8 atau saringan 2,36 mm. Secara umum pengujian agregat halus sama dengan agregat kasar, akan tetapi pada pengujian agregat halus diperlukan ketelitian yang tinggi karena agregat yang halus lebih sulit pengujiannya daripada agregat kasar. Agregat halus yang diuji diperlihatkan pada Gambar 4.3, sedangkan hasil pengujian agregat halus ditunjukkan dalam Tabel 4.3 dan detail perhitungannya dapat dilihat di lampiran A.



Gambar 4.3 Pengujian Agregat Halus

Tabel 4.3 Hasil Pengujian Agregat Halus dan *Filler*

No	Pengujian	Persyaratan	Hasil Pengujian
Agregat Halus			
1	Berat Jenis Bulk, gr/cm ³		2.557
	Berat Jenis Semu, gr/cm ³		2.767
2	Penyerapan Air, %	maks. 3	2.965
Filler			
1	Berat jenis, gr/cm ³	2,4 - 3	2,614
	Berat Jenis Semu, gr/cm ³		2.726

Tabel 4.3 menunjukkan bahwa pemeriksaan agregat halus meliputi penyerapan air, berat jenis bulk, berat jenis *apparent*, analisis saringan dan berat jenis *filler*. Semua pengujian agregat halus dilaksanakan sebanyak dua kali, dan hasil pengujian pada

Tabel 4.3 diatas merupakan reratanya. Hasil pengujian menunjukkan bahwa agregat halus sudah sesuai dengan spesifikasi yang telah ditentukan, yaitu sebagai contoh berat jenis bulk adalah $2,557 \text{ gr/cm}^3$. Nilai ini memenuhi persyaratan nilai minimum sebesar $2,5 \text{ gr/cm}^3$.

4.1.4 Agregat Buatan Geopolimer

Geopolimer merupakan material yang disintesis secara geokimia menggunakan bahan dasar mineral alumina silikat. Seperti yang telah dijelaskan pada bab 2, aktivator yang digunakan sebagai sintesis fly ash adalah 8 molar, terdiri dari sodium hidroksida (NaOH) dan sodium silikat (Na_2SiO_3). Kedua bahan campuran agregat buatan ini diolah dengan komposisi campuran dan spesifikasi properties yang telah didapatkan berdasarkan penelitian yang telah ada (Karyawan et al., 2017).

Hasil penelitian menunjukkan bahwa agregat buatan ini belum memenuhi persyaratan Spesifikasi yaitu nilai berat jenis dan penyerapan air masih diatas 3% tetapi untuk nilai kelekatan, abrasi dan kekekalan agregat memenuhi persyaratan spesifikasi. Walaupun terdapat nilai yang belum memenuhi standar pada pemeriksaan agregat buatan, komposisi agregat buatan yang digunakan pada penelitian ini merupakan komposisi terbaik dari campuran agregat buatan yang telah diteliti sebelumnya (Karyawan et al., 2017) dan memiliki nilai parameter pengujian lainnya yang memenuhi nilai standar spesifikasi yang ditentukan. Tabel 4.4 menunjukan hasil pengujian agregat buatan.

Tabel 4.4 Hasil Pengujian Agregat Buatan Geopolimer

No	Pengujian	Persyaratan	Hasil Pengujian
Agregat Buatan			
1	Berat Jenis Bulk, gr/cm^3		1.85
	Berat Jenis Semu, gr/cm^3		2.09
2	Penyerapan Air, %	maks. 3	6.08
3	Kekekalan agregat terhadap larutan Magnesium Sulfat, %	maks. 18	5.219
4	Abrasi dengan Mesin Los Angeles, %	maks. 40	22.78
5	Kelekatan agregat terhadap aspal, %	min. 95	97

4.2 Pembuatan Agregat Buatan Geopolimer

Fly ash yang digunakan dalam penelitian ini didapatkan dari Paito Steam Power Plant, Probolinggo, Jawa timur dengan kategori fly ash kelas F. Sedangkan jenis aktivator yang digunakan yaitu Sodium Silikat (Na_2SiO_3) dan Sodium Hidroksida (NaOH). NaOH berupa serbuk dan akan dilarutkan dengan menggunakan aquades sehingga menjadi larutan NaOH dan digunakan larutan NaOH 8M. Rumus yang digunakan dalam pembuatan larutan NaOH 8M adalah sebagai berikut:

$$n = V \times M \quad 4.1$$

Dimana:

n = jumlah mol zat terlarut (mol)

M = kemolaran larutan (mol/liter)

V = volume larutan (liter)

$$\text{Massa NaOH} = n \text{ mol} \times M_r \quad 4.2$$

Dimana:

$n \text{ mol}$ = jumlah mol zat terlarut (mol)

M_r = massa relatif atom (gram/mol)

Berikut langkah-langkah pembuatan larutan NaOH 8M:

1. Dihitung kebutuhan NaOH yang akan digunakan
$$n = V \times M = 1 \text{ liter} \times 8 \text{ mol/liter} = 8 \text{ mol}$$
$$\text{Massa NaOH} = n \text{ mol} \times M_r = 8 \text{ mol} \times 40 \text{ gram/mol} = 320 \text{ gram}$$
2. NaOH ditimbang sebanyak 320 gr
3. NaOH dimasukkan ke dalam labu ukur
4. Ditambahkan aquades kedalam labu ukur hingga volumenya 1 liter.
5. Larutan diaduk, lalu kemudian didinginkan sesuai suhu ruang.
6. Wadah larutan ditutup rapat dan disimpan dalam plastic agar tidak terganggu dari zat-zat atau gas diluar yang tidak diinginkan.

Kedua bahan alkali aktivator agregat buatan ini diolah dengan komposisi campuran dan spesifikasi properties yang telah didapatkan berdasarkan penelitian yang telah ada. Komposisi campuran yang digunakan yaitu perbandingan fly ash

dan alkali aktivator sebesar 75%:25% dengan rasio aktifator 1:2,5 (Yuliana et al., 2018).

Berikut langkah-langkah yang dilakukan untuk membuat agregat buatan di laboratorium:

1. Menyiapkan bahan campuran agregat buatan (*fly ash* dan alkali aktivator).

Fly ash ditimbang seperti yang telah dipersyaratkan dalam rencana campuran. Rasio *fly ash* dengan alkali adalah 75%: 25%, maka jumlah alkali adalah 25%: dan 75% *fly ash*. Sebagai contoh, untuk membuat campuran geopolimer sebanyak 2000 gram, diperlukan 75% fly ash dan 25% alkali, dimana rasio Na_2SiO_3 dengan NaOH dalam alkali adalah 1:2,5, maka disiapkan bahan sebagai berikut:

- Fly ash $= 75\% \times 2000 \text{ gram} = 1500 \text{ gram}$
- Alkali aktivator $= 25\% \times 2000 \text{ gram} = 500 \text{ gram}$
 - NaOH $= \frac{1}{3,5} \times 500 \text{ gram} = 142,9 \text{ gram}$
 - Na_2SiO_3 $= \frac{2,5}{3,5} \times 500 \text{ gram} = 357,1 \text{ gram}$

Setelah didapatkan semua bahan campuran agregat buatan, timbang *fly ash* sesuai jumlah rencana dan masukkan dalam kantong plastik. Kemudian untuk alkali aktivator, masukkan NaOH dan Na_2SiO_3 sesuai takaran dengan rasio yang telah dihitung dan campurkan dalam satu wadah, dalam penelitian ini digunakan botol bekas ukuran 600ml.



Gambar 4.4 Fly Ash dan Alkali Aktivator

2. Proses Pembuatan Agregat Buatan

Setelah semua bahan telah tersedia dan siap digunakan, siapkan granulator dengan sudut 50° sebagai mesin untuk memproses pencampuran *fly ash* dan alkali aktivator. Proses granulasi dilakukan dengan memasukkan sejumlah *fly ash* dan

menyemprotkan alkali aktivator hingga *fly ash* dan alkali aktivator tercampur dan memproduksi agregat dengan bentuk *rounded*.



Gambar 4.5 Proses Pembuatan Agregat Buatan dengan Menggunakan Mesin Granulator

4.3 Perencanaan Campuran Aspal Beton

Setelah melakukan pengujian terhadap aspal, agregat kasar, agregat buatan, agregat halus dan *filler*, kegiatan selanjutnya adalah menentukan proporsi material dan merencanakan campuran aspal beton. Dalam hal ini campuran dibuat menjadi dua jenis berdasarkan gradasi agregat yang digunakan, yaitu campuran dengan gradasi rapat menggunakan spesifikasi FAA dan campuran dengan gradasi terbuka menggunakan spesifikasi BBA. Proporsi agregat untuk masing – masing gradasi ditunjukkan pada Tabel 4.5.

Tabel 4.5 Proporsi Agregat

Kebutuhan agregat pada Gradasi Rapat/ <i>Dense graded</i>							Kebutuhan agregat pada Gradasi terbuka/ <i>open graded</i>						
No. Ayakan		batas bawah (%)	Batas Tengah (%)	Batas Atas (%)	Tertahan pd masing-masing		No. Ayakan		batas bawah (%)	Batas Tengah (%)	Batas Atas (%)	Tertahan pd masing-masing	
in	mm				(%)	(gr)	in	mm				(%)	(gr)
3/4	19	100	100	100	0	0	3/4	19	100	100	100	0	0
1/2	12.5	79	89	99	11	132	1/2	12.5	80	90	100	10	120
3/8	9.5	68	78	88	11	132	3/8	9	60	65	70	25	300
No.4	4.75	48	58	68	20	240	No.4	4.75	36	40	44	25	300
No.8	2.38	33	43	53	15	180	No. 10	2	33	36.5	40	3.5	42
No.16	1.18	20	30	40	13	156	No. 80	0.268	10	17.5	25	19	228
No.30	0.59	14	22	30	8	96	No.200	0.074	6	7.5	9	10	120
No. 50	0.27	9	15	21	7	84	Pan					7.5	90
No.100	0.149	6	11	16	4	48	Jumlah					100	1200
No.200	0.074	3	4.5	6	6.5	78							
Pan					4.5	54							
Jumlah					100	1200							

Masing-masing gradasi berguna untuk menentukan proporsi agregat yang akan digunakan sebagai campuran aspal. Proporsi agregat yang dimaksud adalah kandungan agregat kasar dan agregat halus di dalam satu buah sampel seberat 1200gr.

4.4 Penentuan Komposisi Aspal Terhadap Campuran

Perhitungan komposisi aspal digunakan untuk mengetahui nilai aspal ideal dan sebagai perkiraan untuk mencari nilai kadar aspal optimum. Komposisi aspal ditentukan berdasarkan pada masing – masing gradasi tengah pada campuran aspal.

- Perhitungan penentuan kadar aspal optimum diambil pada batas tengah campuran gradasi rapat sesuai dengan persamaan 3.1 sebagai berikut:

$$\begin{aligned} Pb &= 0,035 (\% CA) + 0,045 (\% FA) + 0,18 (\% \text{filler}) + K \\ &= 0,035 (57) + 0,045 (38,5) + 0,18 (4,5) + 0,75 \\ &= 5,287 \approx 5,5 \% \end{aligned}$$

Keterangan:

Pb = Kadar aspal perkiraan, persen terhadap berat campuran;

CA = Persen agregat tertahan saringan No. 8;

FA = Agregat halus lolos saringan No. 8 dan tertahan No. 200;

Filler = Agregat minimal 75% lolos saringan No. 200;

K = Nilai konstanta sekitar 0,5 – 1,0 untuk AC

Dari perhitungan diatas diperoleh nilai perkiraan kadar aspal ideal sebesar 5,5% terhadap total agregat. Selanjutnya untuk mencari kadar aspal optimum umumnya kadar aspal ideal tersebut dibuat benda uji dengan 5 variasi kadar aspal yang masing-masing berbeda 0,5%. Dengan menggunakan perhitungan seperti diatas maka didapat kadar aspal perkiraan dan kebutuhan agregat secara keseluruhan pada Tabel 4.6.

Tabel 4.6 Kadar Aspal Perkiraan dan Kebutuhan Agregat pada Campuran Gradasi Rapat

Kadar Aspal Perkiraan dan Kebutuhan Agregat pada Gradasi Rapat/ <i>Dense Graded</i>																
Kadar Aspal		4.5%			5.00%			5.5%			6.00%			6.5%		
Berat Aspal		54	gr		60	gr		66	gr		72	gr		78	gr	
No. Ayakan		Berat Agregat	Ag. Buatan	Ag. Alami	Berat Agregat	Ag. Buatan	Ag. Alami	Berat Agregat	Ag. Buatan	Ag. Alami	Berat Agregat	Ag. Buatan	Ag. Alami	Berat Agregat	Ag. Buatan	Ag. Alami
3/4	19	0	0		0	0		0	0		0	0		0	0	
1/2	12.5	126.06	31.515	94.545	125.4	31.35	94.05	124.74	31.185	93.555	124.08	31.02	93.06	123.42	30.855	92.565
3/8	9.5	126.06	31.515	94.545	125.4	31.35	94.05	124.74	31.185	93.555	124.08	31.02	93.06	123.42	30.855	92.565
No.4	4.75	229.2	57.3	171.9	228	57	171	226.8	56.7	170.1	225.6	56.4	169.2	224.4	56.1	168.3
No.8	2.38	171.9	42.975	128.925	171	42.75	128.25	170.1	42.525	127.575	169.2	42.3	126.9	168.3	42.075	126.225
No.16	1.18	148.98		148.98	148.2		148.2	147.42		147.42	146.64		146.64	145.86		145.86
No.30	0.59	91.68		91.68	91.2		91.2	90.72		90.72	90.24		90.24	89.76		89.76
No. 50	0.27	80.22		80.22	79.8		79.8	79.38		79.38	78.96		78.96	78.54		78.54
No.100	0.149	45.84		45.84	45.6		45.6	45.36		45.36	45.12		45.12	44.88		44.88
No.200	0.074	74.49		74.49	74.1		74.1	73.71		73.71	73.32		73.32	72.93		72.93
Pan		51.57		51.57	51.3		51.3	51.03		51.03	50.76		50.76	50.49		50.49
Jumlah		1146	163.305	982.695	1140	162.45	977.55	1134	161.595	972.405	1128	160.74	967.26	1122	159.885	962.115

- Perhitungan penentuan kadar aspal optimum diambil pada batas tengah campuran gradasi terbuka sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 P_b &= 0,035 (\% \text{ CA}) + 0,045 (\% \text{ FA}) + 0,18 (\% \text{ filler}) + K \\
 &= 0,035 (60) + 0,045 (32,5) + 0,18 (7,5) + 0,75 \\
 &= 5,7 \approx 6 \%
 \end{aligned}$$

Dari perhitungan diatas diperoleh nilai perkiraan kadar aspal ideal sebesar 6% terhadap total agregat. Selanjutnya untuk mencari kadar aspal optimum umumnya kadar aspal ideal tersebut dibuat benda uji dengan 5 variasi kadar aspal yang masing-masing berbeda 0,5%. Dengan menggunakan perhitungan seperti diatas maka didapat kadar aspal perkiraan dan kebutuhan agregat secara keseluruhan pada Tabel 4.7.

Tabel 4.7 Kadar Aspal Perkiraan dan Kebutuhan Agregat pada Campuran Gradasi Terbuka

Kadar Aspal Perkiraan dan Kebutuhan Agregat pada Gradasi Terbuka/Open Graded																
Kadar Aspal		5%			5.50%			6.0%			6.50%			7.0%		
Berat Aspal		60	gr		66	gr		72	gr		78	gr		84	gr	
No. Ayakan		Berat Agregat	Ag. Buatan	Ag. Alami	Berat Agregat	Ag. Buatan	Ag. Alami	Berat Agregat	Ag. Buatan	Ag. Alami	Berat Agregat	Ag. Buatan	Ag. Alami	Berat Agregat	Ag. Buatan	Ag. Alami
3/4		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1/2		114	28.5	85.5	113.4	28.35	85.05	112.8	28.2	84.6	112.2	28.05	84.15	111.6	27.9	83.7
3/8		285	71.25	213.75	283.5	70.875	212.625	282	70.5	211.5	280.5	70.125	210.375	279	69.75	209.25
No.4		285	71.25	213.75	283.5	70.875	212.625	282	70.5	211.5	280.5	70.125	210.375	279	69.75	209.25
No. 10		39.9		39.9	39.69		39.69	39.48		39.48	39.27		39.27	39.06		39.06
No. 80		216.6		216.6	215.46		215.46	214.32		214.32	213.18		213.18	212.04		212.04
No.200		114		114	113.4		113.4	112.8		112.8	112.2		112.2	111.6		111.6
Pan		85.5		85.5	85.05		85.05	84.6		84.6	84.15		84.15	83.7		83.7
Jumlah		1140	171	969	1134	170.1	963.9	1128	169.2	958.8	1122	168.3	953.7	1116	167.4	948.6

Tabel 4.6 dan Tabel 4.7 menunjukkan proporsi material yang digunakan untuk membuat benda uji seberat 1200 gr pada gradasi rapat dan gradasi terbuka. Benda uji yang dibuat mempunyai 5 macam campuran.

4.5 Penentuan Kadar Aspal Optimum

Kadar aspal optimum merupakan kondisi dimana suatu kandungan aspal di dalam campuran mampu menghasilkan karakteristik yang memenuhi spesifikasi dan berada pada perkiraan perhitungan kadar aspal optimum rencana.

4.5.1 Kadar Aspal Optimum Gradasi Terbuka (BBA)

Penentuan kadar aspal ini ditentukan berdasarkan *trend* kurva hubungan kadar aspal dengan parameter hasil pengujian *Marshall* dan nilai volumetrik yang

disesuaikan dengan kebutuhan. Langkah penentuan kadar aspal optimum berikut diambil contoh pada campuran gradasi Terbuka (BBA). Supaya lebih jelas penentuan kadar aspal optimum diuraikan sebagai berikut:

- A. Untuk menentukan kadar aspal optimum, pertama harus membuat benda uji terlebih dahulu. Pada contoh perhitungan ini, menggunakan campuran dengan gradasi terbuka, jadi proporsi material dalam aspal beton menyesuaikan Tabel 4.7. Dalam Tabel 4.7 tersebut diketahui terdapat 5 campuran yang akan dibuat benda uji dengan kadar aspal berbeda, yaitu campuran 1 dengan kadar aspal 5%; campuran 2 dengan kadar aspal 5,5%; campuran 3 dengan kadar aspal 6,0%; campuran 4 dengan kadar aspal 6,6%; dan campuran 5 dengan kadar aspal 7%. Setiap campuran dibuat 3 buah benda uji, sehingga total benda uji untuk campuran jalan bergradasi tengah adalah 15 buah.
- B. Setelah membuat benda uji sesuai ketentuan di poin A, kemudian benda uji diuji karakteristiknya dengan pengujian *Marshall* untuk mengetahui nilai stabilitas, kelelahan dan volumetrik campurannya. Data hasil pengujian *Marshall* ditunjukkan pada Tabel 4.8.

Hasil perhitungan karakteristik dari berbagai macam kadar aspal tersebut selanjutnya digunakan untuk mencari nilai kadar aspal optimum. Beberapa parameter seperti kepadatan, rongga dalam campuran (VIM), rongga dalam mineral agregat (VMA) dan rongga terisi aspal (VFB) diperoleh dari hasil analisis terhadap pengujian *Marshall*. Rumus-rumus yang digunakan dalam analisis *Marshall* ditunjukkan pada Lampiran B. Hasil perhitungan karakteristik ditunjukkan dalam Tabel 4.9 dan untuk detail perhitungannya dapat dilihat di lampiran B.

Tabel 4.8 Data Hasil Pengujian *Marshall*

Kadar Aspal	Gradasi Rapat (FAA)			Gradasi Terbuka (BBA)		
	H	Stabilitas	Flow	H	Stabilitas	Flow
%	mm	kg	mm	mm	kg	mm
4.5	71.4	460	3.20	-	-	-
	70.7	530	2.60	-	-	-
	71.0	550	3.00	-	-	-
5	69.5	655	3.30	71.9	620	4.40
	69.3	550	2.70	71.3	725	3.30
	69.4	595	2.90	69.0	640	3.30
5.5	68.3	625	4.00	69.4	640	3.10
	68.0	615	3.50	71.3	750	3.90
	68.4	570	2.80	68.1	705	4.10
6	67.5	540	3.00	69.3	700	4.00
	66.5	650	4.00	68.5	710	4.00
	67.4	590	3.40	68.1	600	3.90
6.5	66.6	545	3.30	67.4	600	4.10
	66.4	620	3.00	68.1	595	4.00
	68.9	585	4.20	67.1	550	3.90
7	-	-	-	66.6	555	4.00
	-	-	-	66.5	580	4.30
	-	-	-	67.2	500	3.90

Dari Tabel 4.8 terdapat data hasil pengujian pada campuran dengan dua gradasi berbeda yaitu gradasi FAA dan gradasi BBA dimana tiap variasi kadar aspal dibuat sebanyak 3 sampel. Data H merupakan rata-rata tinggi benda uji kering yang diukur menggunakan jangka sorong yang mana tinggi diambil pada 3 titik di setiap sampelnya dan dihitung reratanya, sedangkan data stabilitas dan flow didapatkan dengan membaca dial secara langsung saat dilakukan pengujian *Marshall*.

Untuk perhitungan *Marshall* diperlukan data yaitu berat jenis yang didapatkan dari pemeriksaan di laboratorium. Selain itu perlu diketahui nilai koreksi benda uji, kalibrasi alat dan tinggi dari sampel yang dibuat. Analisis *Marshall* dilakukan dengan variasi kadar aspal. Contoh perhitungan berikut adalah untuk gradasi terbuka BBA dengan kadar aspal 5%. Perhitungan lengkap untuk

kadar aspal lainnya dapat dilihat pada Lampiran B. Contoh perhitungan pada analisis *Marshall* adalah sebagai berikut:

- Data Benda Uji

Tinggi benda uji = 71,93 mm
 Berat sampel = 1200 gram
 Berat aspal = 5% x 1200 gram = 60 gram
 Berat jenis aspal = 1,033
 Kadar agregat = 100 – kadar aspal = 100 – 5% = 95%
 Berat kering = 1173,4 gram
 Berat jenuh/SSD = 1194,7 gram
 Berat dalam air = 655 gram
 Berat jenis efektif agregat kasar

$$= \frac{B_j \text{ agregat} + B_j \text{ semu}}{2} = \frac{2,542 + 2,703}{2} = 2,622 \text{ gr/cm}^3$$

Berat jenis efektif (Gse)

$$= \frac{100}{\frac{\% \text{ agregat kasar}}{B_j \text{ efektif kasar}} + \frac{\% \text{ agregat halus}}{B_j \text{ efektif halus}} + \frac{\% \text{ Filler}}{B_j \text{ efektif Filler}} + \frac{\% \text{ agregat buatan}}{B_j \text{ efektif agr. buatan}}}$$

$$= \frac{100}{\frac{45\%}{2,622} + \frac{32,50\%}{2,723} + \frac{7,50\%}{2,669} + \frac{15\%}{1,971}} = 2,531 \text{ gr/cm}^3$$

Volume benda uji = berat SSD – berat dalam air = 1194,7 - 655 = 539,7 gram

Berat jenis bulk campuran padat (Gmb)

$$= \frac{\text{berat kering}}{\text{vol. benda uji}} = \frac{1173,4}{539,7} = 2,17 \text{ gr}$$

Berat jenis maksimum campuran (Gmm)

$$= \frac{100}{\frac{\% \text{ agregat}}{B_j \text{ efektif agregat}} + \frac{\% \text{ aspal}}{b_j \text{ aspal}}} = \frac{100}{\frac{95\%}{2,531} + \frac{5\%}{1,033}} = 2,359$$

Volume total aspal = $\frac{kd.\text{aspal} \times Gmb}{b_j.\text{aspal}} = \frac{5\% \times 2,17}{1,033} = 10,53 \%$

Volume total agregat = $\frac{100 - \text{kadar aspal}}{b_j.\text{agr. efektif}} \times Gmb = 81,61 \%$

Dari data diatas dilakukan perhitungan *Marshall* untuk mendapatkan nilai Stabilitas, VIM, VMA, VFB, *Flow*, dan MQ. Berikut adalah contoh perhitungan *Marshall*.

- Perhitungan *Marshall*

Rongga udara dalam campuran (VIM)

$$= 100 \times \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} = 100 \times \frac{2,359 - 2,17}{2,359} = 7,86 \%$$

Rongga antar agregat (VMA)

$$= 100 - \text{vol. total agregat} = 100 - 81,61 = 18,39 \%$$

Rongga terisi aspal (VFB)

$$= 100 \times \left(\frac{\text{vol. total aspal}}{VMA} \right) = 100 \times \frac{10,53\%}{18,39\%} = 57,26 \%$$

Stabilitas bacaan alat = 620

Stabilitas terkoreksi:

Koreksi tinggi = 0,82 (lihat tabel)

Faktor kalibrasi = $0,454 \times 7,28 = 3,305$

Stabilitas setelah koreksi = stabilitas bacaan alat x koreksi tinggi x faktor kalibrasi

$$= 620 \times 0,82 \times 3,305 = 1687,15 \text{ kg}$$

Flow = 4,40 mm

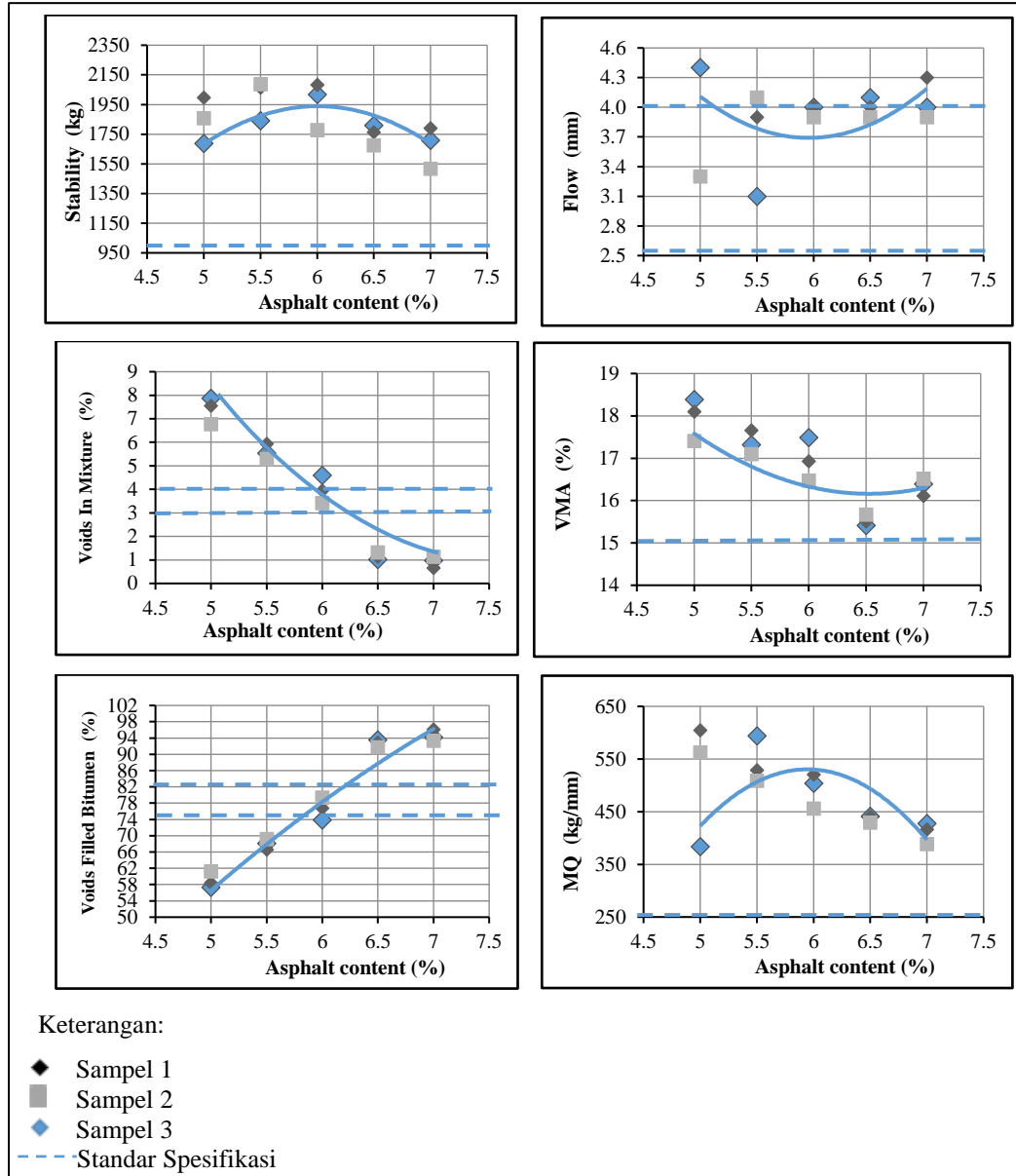
$$\text{Marshall Quotient (MQ)} = \frac{\text{stabilitas}}{\text{flow}} = \frac{1687,15 \text{ kg}}{4,40 \text{ mm}} = 383,44 \text{ kg/mm}$$

Tabel 4.9 Hasil Pengujian Karakteristik Campuran Gradasi Terbuka (BBA)
Untuk Mencari KAO

Karakteristik Campuran	Gradasi Terbuka (BBA)					Spesifikasi
	Kadar Aspal (%)					
	5	5.5	6	6.5	7	
Stabilitas (kg)	1846.18	1996.045	1957.795	1747.835	1671.016	≥ 2150 lbs (971kg)
Flow (mm)	3.67	3.70	3.97	4.00	4.07	2.5-4
VIM (%)	7.11	6.00	3.93	1.94	0.38	3-4
VMA (%)	16.25	16.27	15.45	14.72	14.40	≥ 15
VFB (%)	56.32	63.14	74.55	86.95	97.37	76-82
MQ (kg/mm)	516.85	543.70	493.24	436.84	410.58	≥ 250

Dari Tabel 4.9 diketahui bahwa karakteristik campuran didapatkan dari rata-rata 3 benda uji. Dari nilai karakteristik campuran yang didapat, diketahui untuk nilai stabilitas, *flow*, dan VMA pada setiap kadar aspal memenuhi spesifikasi. Untuk nilai VIM dan nilai VFB dari lima kadar aspal, empat kadar aspal tidak memenuhi spesifikasi.

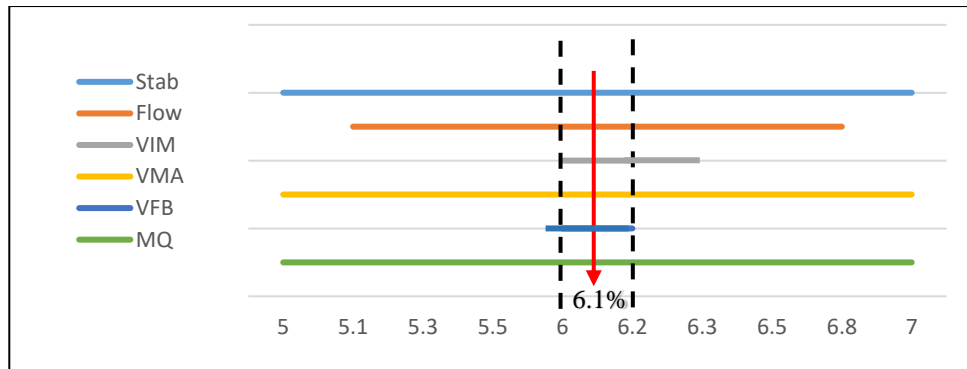
C. Selain disajikan dengan tabel, karakteristik campuran ditunjukkan dalam grafik hubungan kadar aspal dengan masing-masing sifat karakteristik campuran. Grafik tersebut dapat diperlihatkan sebagai berikut:



Grafik diatas memperlihatkan setiap karakteristik yang ditarik garis polinomial terhadap penambahan kadar aspalnya. Dari hasil penarikan garis polinomial didapat bahwa: semakin banyak kadar aspal, maka trend stabilitasnya akan menurun; semakin banyak kadar aspal, maka trend *flow* nya akan menurun; semakin banyak kadar aspal, maka trend nilai VIM nya akan menurun; semakin banyak kadar aspal, maka trend VMA nya akan meningkat; semakin banyak

kadar aspal, maka trend VFB nya akan meningkat; dan semakin banyak kadar aspal, maka trend *MQ* akan menurun.

- D. Selanjutnya memasukkan semua hasil karakteristik dari setiap kadar aspal kedalam diagram barchat seperti Gambar 4.6. Dalam gambar tersebut diketahui bahwa nilai karakteristik yang berada dalam garis hitam putus – putus merupakan nilai karakteristik yang memenuhi spesifikasi.



Gambar 4.6 Menentukan Kadar Aspal Optimum

Dari Gambar 4.6 diatas diketahui bahwa pada kadar aspal 6,0 % dan 6,2% menghasilkan karakteristik campuran yang telah memenuhi spesifikasi. Sehingga kadar aspal optimum merupakan rata-rata kedua kadar aspal tersebut. Rata – rata kedua kadar aspal adalah sebesar 6,1% . Jadi kadar aspal 6,1% telah memenuhi sifat campuran dan akan digunakan dalam desain campuran.

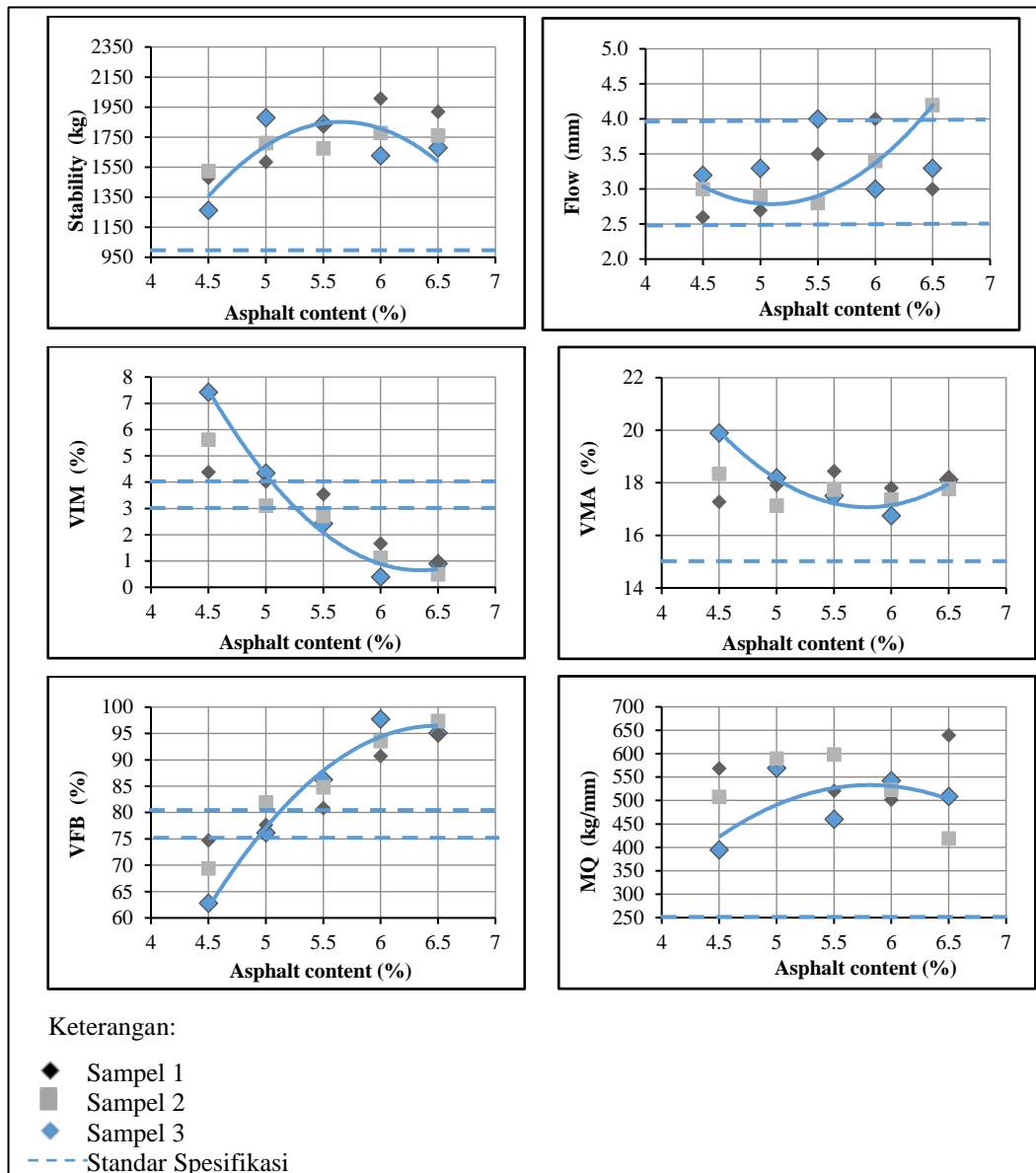
4.5.2 Kadar Aspal Optimum Gradasi Rapat (FAA)

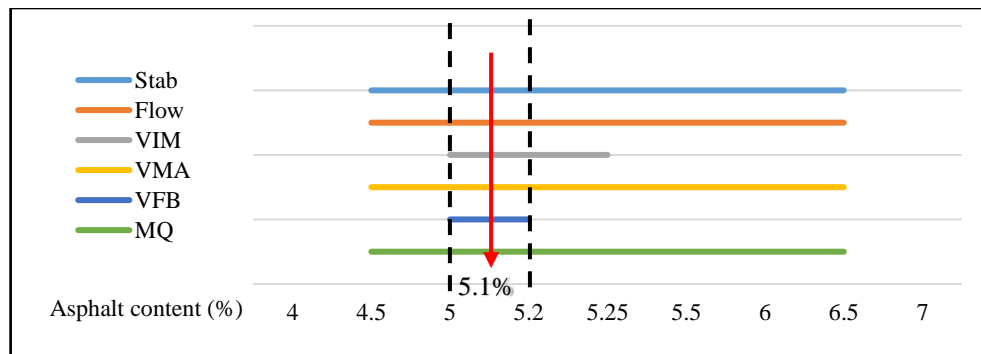
Setelah dilakukan pengujian *Marshall* terhadap campuran gradasi rapat dengan variasi kadar aspal yang telah ditentukan dan menggunakan cara yang sama seperti langkah pada gradasi terbuka, maka hasil perhitungan karakteristik terhadap pengujian *Marshall* campuran gradasi rapat (FAA) dapat dilihat pada Tabel 4.10 dan grafik. Dari Tabel 4.10 diketahui bahwa karakteristik campuran didapatkan dari rata-rata 3 benda uji. Dari nilai karakteristik campuran yang didapat, diketahui untuk nilai stabilitas, *flow*, dan VMA pada setiap kadar aspal memenuhi spesifikasi. Selanjutnya hasil karakteristik dari setiap kadar aspal dimasukan kedalam diagram barchat seperti Gambar 4.7. Dalam gambar tersebut diketahui bahwa nilai karakteristik yang berada dalam garis hitam putus – putus merupakan nilai karakteristik yang memenuhi spesifikasi.

Tabel 4.10 Hasil Pengujian Karakteristik Campuran Gradasi Rapat (FAA) Untuk Mencari KAO

Karakteristik Campuran	Gradasi Rapat (FAA)					Spesifikasi
	Kadar Aspal (%)					
	4.5	5	5.5	6	6.5	
Stabilitas (kg)	1420.83	1723.44	1778.47	1803.13	1785.16	≥ 2150 lbs (971kg)
Flow (mm)	2.93	2.97	3.43	3.47	3.50	2.5-4
VIM (%)	5.80	3.82	2.89	1.06	0.77	3-4
VMA (%)	18.50	17.74	17.89	17.30	18.01	≥ 15
VFB (%)	68.92	78.54	83.93	93.97	95.74	76-82
MQ (kg/mm)	490.10	581.60	526.11	522.08	522.25	≥ 250

Grafik karakteristik campuran gradasi rapat (FAA):





Gambar 4.7 Grafik Penentuan Kadar Aspal Optimum Gradasi Rapat

Setelah seluruh kadar aspal optimum didapatkan seperti ditunjukkan dalam Tabel 4.11, selanjutnya kadar aspal tersebut digunakan untuk menghitung desain campuran aspal beton dengan penggunaan agregat buatan geopolimer.

Tabel 4.11 Hasil Perhitungan Kadar Aspal Optimum

Gradasi	Kadar Aspal Optimum
Gradasi Rapat/ <i>Dense Grade</i>	5,1 %
Gradasi Terbuka/ <i>Open Grade</i>	6,1 %

4.6 Desain Campuran Aspal Beton dengan Penggunaan Agregat Buatan Geopolimer

Desain campuran berikut digunakan untuk membuat aspal beton dengan penggunaan agregat buatan geopolimer. Proporsi aspal yang digunakan berdasarkan kadar aspal optimum yang telah didapatkan sesuai Tabel 4.10. Sehingga kebutuhan agregat yang digunakan untuk aspal beton geopolimer harus dihitung kembali menggunakan kadar aspal optimum tersebut. Seperti telah dijelaskan sebelumnya pembuatan campuran aspal terbagi menjadi dua, yaitu campuran gradasi rapat (FAA) dan campuran gradasi terbuka (BBA). Kebutuhan agregat campuran ditunjukkan pada Tabel 4.12 dan Tabel 4.13.

Tabel 4.12 Kebutuhan Agregat Campuran dengan Gradasi Agregat Rapat (FAA)

Kebutuhan Agregat				
Kadar Aspal (%)		5,1		
Berat Aspal (gr)		61,2		
No. Ayakan		Berat Agregat	Agregat Buatan (25%)	Agregat Alami (75%)
¾'	19 mm	0	0	0
½'	12,5 mm	125,268	31,317	93,951
3/8'	9,5 mm	125,268	31,317	93,951
No. 4	4,75 mm	227,76	56,94	170,82
No. 8	2,38 mm	170,82	42,705	128,115
No. 16	1,18 mm	148,044		148,004
No. 30	0,59 mm	91,104		91,104
No. 50	0,27 mm	79,716		79,716
No. 100	0,149 mm	45,552		45,552
No. 200	0,074 mm	74,002		74,002
Pan		51,246		51,246
Jumlah		1138,8	162,279	976,521

Tabel 4.12 memperlihatkan kebutuhan agregat yang digunakan sebagai campuran aspal bergradasi rapat. Hasil perhitungan Tabel 4.12 menunjukkan bahwa, di dalam aspal beton seberat 1200 gr tersusun atas aspal dengan berat 61,2 gr dan agregat buatan geopolimer seberat 162,279 gr dan agregat alami seberat 976,52 gr.

Tabel 4.13 Kebutuhan Material Campuran dengan Gradasi Agregat Terbuka (BBA)

Kebutuhan Agregat			
Kadar Aspal (%)		6,1	
Berat Aspal (gr)		73,2	
No. Ayakan		Berat Agregat	Agregat Buatan (25%) Agregat Alami (75%)
¾'		0	0
½'		112,68	31,317
3/8'		281,7	31,317
No. 4		281,7	56,94
No. 10		39,438	
No. 80		214,092	
No. 200		112,68	
Pan		84,51	
Jumlah		1126,8	169,02

Tabel 4.13 memperlihatkan kebutuhan agregat yang digunakan sebagai campuran aspal bergradasi terbuka. Hasil perhitungan Tabel 4.13 menunjukkan bahwa, di dalam aspal seberat 1200 gr tersusun atas aspal dengan berat 73,2 gr dan agregat buatan geopolimer seberat 169,02 gr dan agregat alami seberat 957,78 gr.

4.7 Hasil Pengujian Karakteristik Campuran

Pengujian karakteristik campuran dilakukan untuk mengetahui stabilitas, kelelahan (*flow*), *Marshall Quotient*, dan volumetrik aspal beton. Nilai stabilitas dan kelelahan merupakan besaran yang diukur langsung dari pengujian pada saat benda uji dibebani dengan alat uji *Marshall*. Sedangkan nilai volumetrik campuran yang dilakukan meliputi rongga dalam campuran (VIM), rongga dalam mineral agregat (VMA), dan rongga terisi aspal (VFB) yang merupakan parameter yang sangat berpengaruh terhadap sifat campuran beraspal. Dalam penelitian ini karakteristik campuran ditinjau berdasarkan campuran aspal beton dengan penggunaan agregat buatan geopolimer yang menggunakan gradasi rapat (FAA) dan gradasi terbuka (BBA).

4.7.1 Pengaruh Variasi Gradasi Terhadap Karakteristik Aspal Beton

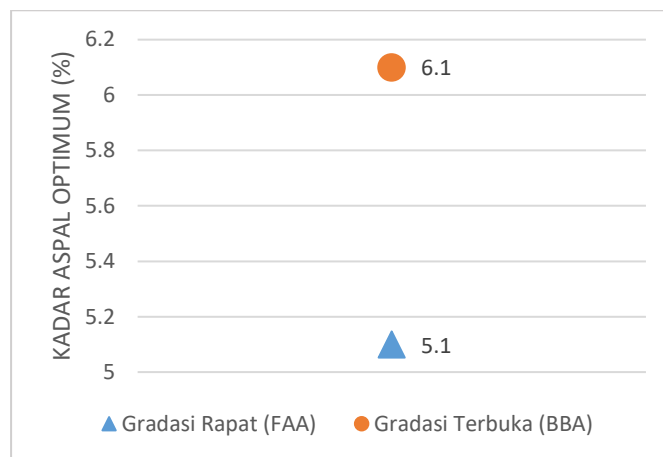
Untuk mengetahui pengaruh variasi gradasi terhadap karakteristik campuran, hasil pengujian dijelaskan dalam Tabel 4.14. Tabel 4.14 menunjukkan terdapat dua macam campuran yang dibuat menggunakan agregat buatan geopolimer. Kedua campuran tersebut terbagi atas gradasi yang berbeda, yaitu gradasi rapat menurut spesifikasi FAA dan gradasi terbuka menurut spesifikasi BBA.

Tabel 4.14 Hasil Pengujian Karakteristik Campuran dengan Variasi Gradasi Agregat

No	Karakteristik Campuran	Variasi Gradasi Agregat		Spesifikasi
		Gradasi Rapat	Gradasi Terbuka	
1	Kadar Aspal Optimum (%)	5.1	6.1	
2	Stabilitas (kg)	2039.08	2055.92	≥ 2150 lbs (971 kg)
3	Flow (mm)	3.60	3.63	2.5 - 4
4	VIM (%)	3.76	3.83	3 - 4
5	VMA (%)	17.88	17.50	≥ 15
6	VFB (%)	78.97	78.15	76 - 82
7	MQ (kg/mm)	571.79	566.76	≥ 250

Dan spesifikasi pengujian karakteristik campuran dilakukan berdasarkan standart *Federal Aviation Administration* (2014) dan Peraturan Direktur Jenderal Perhubungan Udara. Untuk detail perhitungan dapat dilihat di lampiran B. Untuk mengetahui lebih detail pengaruh gradasi agregat terhadap setiap karakteristik campuran aspal beton geopolimer, maka dijelaskan dalam uraian berikut:

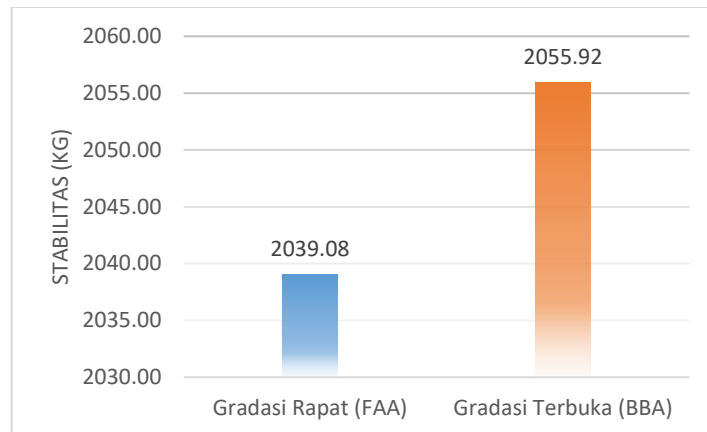
1. Pengaruh Gradasi Agregat Terhadap Kadar Aspal Optimum



Gambar 4.8 Pengaruh Gradasi Agregat Terhadap Kadar Aspal Optimum

Berdasarkan Gambar 4.8 terlihat bahwa KAO pada campuran gradasi terbuka lebih tinggi dari campuran aspal gradasi rapat. Hal ini disebabkan karena butir agregat pada gradasi rapat lebih bervariasi sehingga campuran menghasilkan rongga yang lebih sedikit. Nilai rongga yang kecil menyebabkan kadar aspal yang dibutuhkan juga lebih sedikit karena agregat telah saling mengisi. Sedangkan pada gradasi terbuka, campuran memiliki nilai kadar aspal optimum yang lebih tinggi karena dominasi butir agregat kasar membuat nilai rongga yang besar sehingga dibutuhkan lebih banyak kadar aspal untuk menghasilkan campuran dengan kekuatan yang optimum.

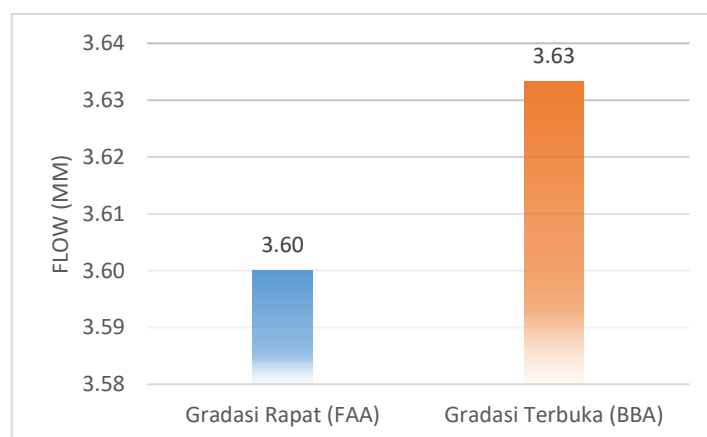
2. Pengaruh Gradasi Agregat Terhadap Stabilitas



Gambar 4.9 Pengaruh Gradasi Agregat Terhadap Stabilitas

Gambar 4.9 menunjukkan bahwa stabilitas gradasi rapat 2039 kg, dan gradasi terbuka 2055,91 kg. Dapat dilihat bahwa campuran gradasi terbuka BBA memiliki nilai stabilitas yang lebih besar daripada campuran gradasi rapat FAA. Ini disebabkan karena gradasi maupun butiran agregat yang digunakan pada campuran gradasi terbuka memiliki nilai fraksi kasar yang lebih besar. Walaupun memiliki nilai stabilitas yang berbeda, kedua jenis gradasi tersebut memiliki nilai stabilitas yang memenuhi standar spesifikasi yang disyaratkan sesuai dengan standar Spesifikasi *Federal Aviation Administration* (FAA) yaitu minimal 2150 lbs atau 971 kg.

3. Pengaruh Gradasi Agregat Terhadap *Flow*

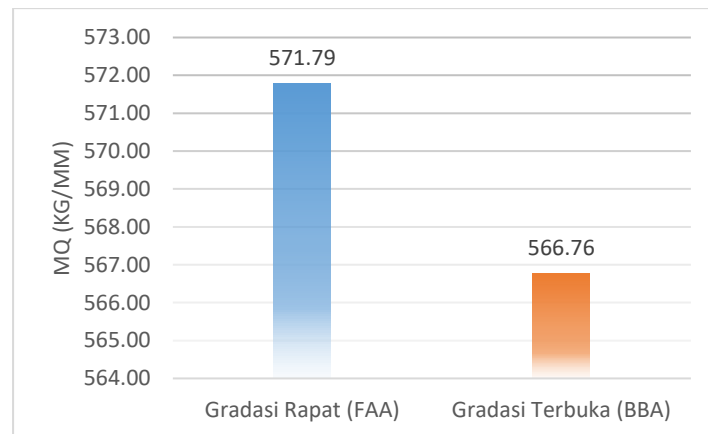


Gambar 4.10 Pengaruh Gradasi Agregat Terhadap *Flow*

Gambar 4.10 menunjukkan bahwa *flow* pada gradasi rapat FAA adalah 3,60 mm, dan *flow* pada gradasi terbuka BBA adalah 3,63 mm. Kelelehan (*flow*)

adalah fungsi dari kekakuan aspal pengikat dan kadar aspal campuran. Kelelehan merupakan parameter empiris yang menjadi indikator terhadap kelenturan atau perubahan bentuk plastis campuran beraspal yang diakibatkan oleh beban. Campuran yang memiliki nilai kelelehan yang rendah dan stabilitas yang tinggi, cenderung menjadi kaku, getas (*brittle*), dan rentan terhadap retak, sedangkan campuran yang memiliki nilai kelelehan yang tinggi dengan stabilitas yang rendah cenderung plastis dan mudah berubah bentuk apabila mendapatkan beban lalu lintas yaitu memiliki potensi untuk mengalami deformasi permanen pada saat terjadi pembebanan.

4. Pengaruh Gradasi Agregat Terhadap *Marshall Quotient*



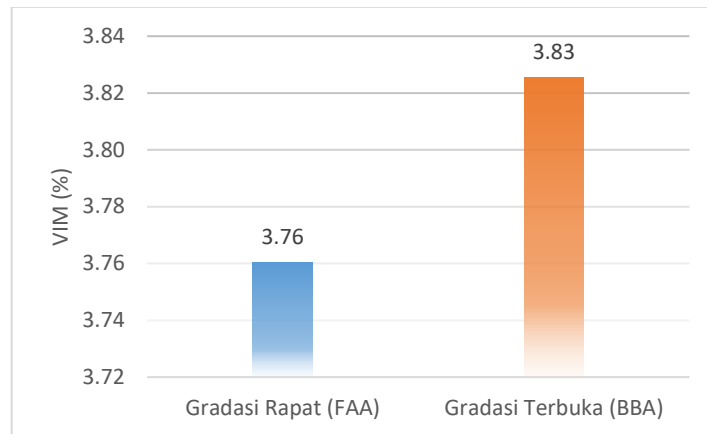
Gambar 4.11 Pengaruh Gradasi Agregat Terhadap *Marshall Quotient*

Gambar 4.11 menunjukkan bahwa *Marshall Quotient* gradasi rapat FAA 571,79 kg/mm, sedangkan *Marshall Quotient* gradasi terbuka BBA 566,76 kg/mm. Dapat dilihat bahwa campuran memenuhi syarat spesifikasi yaitu nilai *MQ* minimal 250 kg/mm. *Marshall Quotient* merupakan hasil bagi dari nilai stabilitas dan *flow*, sehingga untuk mencapai *Marshall Quotient* yang besar dibutuhkan stabilitas tinggi dan *flow* yang rendah, dan sebaliknya. *Marshall Quotient* yang besar menunjukkan campuran lebih kaku dan tidak mudah terdeformasi.

5. Pengaruh Gradasi Agregat Terhadap *Void in Mixture*

VIM adalah banyaknya rongga dalam campuran yang dinyatakan dalam persentase. Nilai VIM berpengaruh terhadap durabilitas dari campuran serta

diperlukan agar memberikan cukup ruang untuk pemadatan akibat beban lalu lintas dan juga pengaruh peningkatan temperatur. Karena itu nilai VIM sangat menentukan karakteristik campuran. Nilai VIM (*Void in Mix*) dipengaruhi oleh gradasi agregat, kadar aspal dan kepadatan. Pengaruh gradasi agregat terhadap nilai VIM ditunjukkan pada Gambar 4.12.



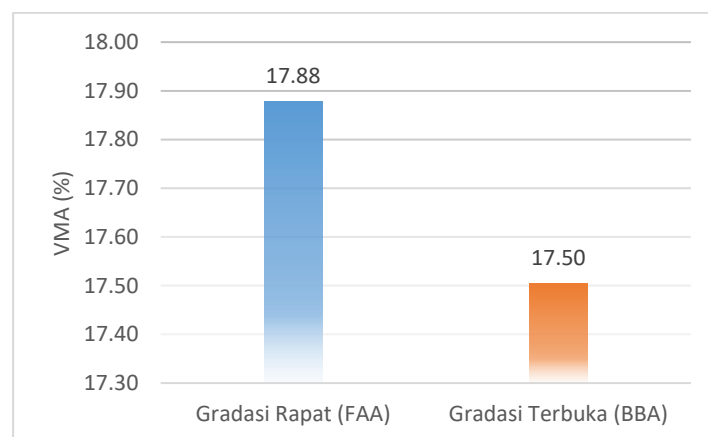
Gambar 4.12 Pengaruh Gradasi Agregat Terhadap *Void in Mixture*

Dari Gambar 4.12 menunjukkan bahwa *Void in Mixture* gradasi rapat 3,76%, lebih kecil daripada gradasi terbuka sebesar 3,83%. Hal ini terjadi karena gradasi rapat mempunyai campuran yang lebih halus dan kandungan filler yang lebih banyak, sehingga dapat memperkecil rongga yang terbentuk. Jika nilai VIM terlalu tinggi mengindikasikan campuran tersebut bersifat porous yang akan mengakibatkan berkurangnya keawetan dari lapis perkerasan karena rongga yang terlalu besar akan memudahkan masuknya air dan udara kedalam lapis perkerasan, jika hal ini terjadi akan menimbulkan pelepasan butiran (*raveling*). Selain itu, udara akan mengoksidasi aspal sehingga selimut aspal menjadi tipis dan kohesi aspal menjadi berkurang sehingga menyebabkan keretakan pada perkerasan. Sedangkan air akan melarutkan bagian aspal yang tidak teroksidasi sehingga pengurangan jumlah aspal akan lebih cepat. Sebaliknya, nilai VIM yang kecil menunjukkan kekuatan terhadap pengelupasan, namun nilai minimum VIM harus dibatasi karena VIM yang terlalu kecil memiliki potensi terjadinya *bleeding* dan campuran rentan terhadap alur plastis (*rutting*). Hal ini disebabkan tidak tersedianya ruang yang cukup untuk menampung

ekspansi aspal akibat pemadatan lanjutan oleh lalu lintas dan peningkatan temperatur. Untuk itu diperlukan nilai standar dimana berdasarkan spesifikasi FAA untuk target rongga udara adalah sebesar 3,5% atau spesifikasi Kemenhub sebesar 3%-4%.

6. Pengaruh Gradasi Agregat Terhadap *Void in the Mineral Agregate*

VMA adalah rongga udara yang ada diantara mineral agregat di dalam campuran perkerasan yang sudah dipadatkan termasuk ruang yang terisi aspal atau dapat dikatakan sebagai jumlah volume udara dan volume aspal efektif dengan tidak memperhitungkan volume aspal yang terserap oleh agregat. VMA dinyatakan dalam prosentase. Menurut spesifikasi FAA persyaratan nilai VMA adalah $\geq 15\%$. VMA digunakan sebagai ruang untuk menampung aspal dan volume rongga yang diperlukan dalam campuran perkerasan, besarnya nilai VMA dipengaruhi oleh kadar aspal, gradasi campuran, jumlah tumbukan dan temperatur pemadatan.



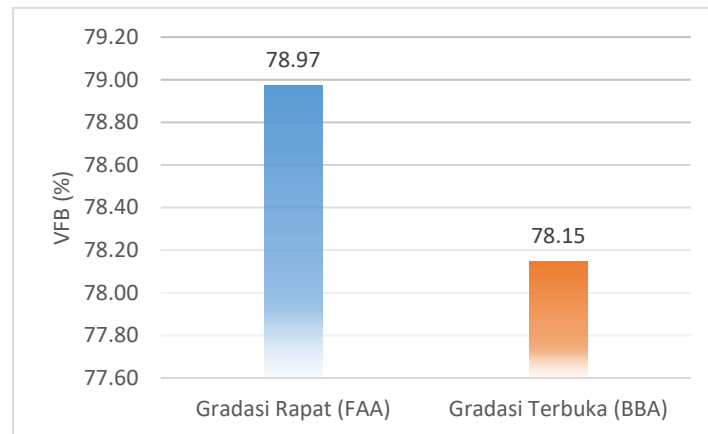
Gambar 4.13 Pengaruh Gradasi Agregat Terhadap *Void in the Mineral Agregate*

Dari gambar 4.13 menunjukkan bahwa *Void in the mineral agregate* gradasi rapat 17,88%, lebih tinggi daripada gradasi terbuka sebesar 17,50%. Sejalan dengan hasil tersebut penelitian lain menunjukkan bahwa *void in the mineral agregate* dapat meningkat seiring bertambahnya persentase agregat halus dalam campuran. Nilai VMA yang mendekati nilai minimum menunjukkan bahwa campuran lebih memiliki keawetan, sedangkan nilai VMA yang tinggi akan mengakibatkan campuran

memiliki deformasi yang terlalu besar. Namun pada prinsipnya, dengan semakin meningkatnya kadar aspal, maka nilai VMA akan cenderung mengalami penurunan hingga mencapai titik minimum dan akan meningkat kembali sesuai penambahan kadar aspal yang lebih tinggi. Hal ini disebabkan karena aspal akan memenuhi rongga antar agregat tersebut hingga rongga sudah tidak dapat diisi oleh aspal, dalam hal ini nilai VMA menjadi minimum.

7. Pengaruh Gradasi Agregat Terhadap *Volume of voids Filled Bitument*

VFB adalah nilai yang menunjukkan banyaknya rongga yang terisi aspal, tidak termasuk aspal yang terserap ke dalam agregat. Nilai ini berpengaruh terhadap kekedapan campuran terhadap air dan udara, serta elastisitas campuran. Nilai VFB dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti suhu pemadatan, jenis dan kadar aspal, serta gradasi agregatnya. Nilai VFB yang besar mengindikasikan banyaknya rongga udara yang terisi aspal sehingga kekedapan campuran terhadap air dan udara serta elastisitas akan semakin tinggi. Nilai VFB yang terlalu tinggi akan menyebabkan lapis perkerasan mudah mengalami *bleeding* atau naiknya aspal ke permukaan. Sedangkan Nilai VFB yang terlalu kecil akan menyebabkan kekedapan campuran terhadap air berkurang karena sedikit rongga yang terisi aspal. Dengan banyaknya rongga yang kosong, air dan udara akan masuk kedalam lapis perkerasan sehingga keawetan dari lapis perkerasan akan berkurang. Hubungan antara VFB dan kadar aspal menunjukkan kecenderungan bahwa nilai VFB akan bertambah seiring meningkatnya kadar aspal. Hal ini disebabkan karena rongga dalam campuran akan terisi oleh aspal bila kadar aspal ditingkatkan.



Gambar 4.14 Pengaruh Gradasi Agregat Terhadap *Volume of voids Filled Bitument*

Dari Gambar 4.14 menunjukkan bahwa volume of voids filled with asphalt gradasi rapat 79,97%, lebih besar daripada gradasi terbuka sebesar 78,15%. Nilai VFB menunjukkan perbandingan jumlah kandungan aspal dan jumlah kandungan rongga didalam campuran. Nilai VFB yang rendah berarti jumlah aspal efektif yang mengisi rongga-rongga antar butir agregat sedikit, berarti rongga udaranya besar. Hal ini akan mengurangi keawetan dari campuran. Sebaliknya nilai VFB yang terlalu tinggi akan menyebabkan bleeding karena rongga antar butiran terlalu kecil. Dalam penelitian ini, persyaratan yang digunakan adalah standar spesifikasi FAA yaitu nilai VFB sebesar 76%-82%.

4.7.2 Pengujian Perendaman *Marshall (Immersion Test)*

Pengujian perendaman adalah pengujian yang bertujuan untuk mengetahui ketahanan campuran terhadap kerusakan oleh air atau yang disebut Indeks Kekuatan *Marshall* Sisa (IRS) atau *Marshall Index of Retained Strength*. Pada pengujian ini akan didapatkan nilai indeks perendaman yang dinyatakan dalam persen (%). Spesifikasi Umum Bina Marga 2010 Revisi 3 telah menetapkan batas minimal untuk indeks perendaman campuran AC-WC adalah minimal 90% dari nilai stabilitas *Marshall*. Data hasil penelitian dapat dilihat pada Tabel 4.15.

Tabel 4.15 Data Hasil Pengujian Perendaman

Data <i>Marshall</i>	Gradasi Rapat (FAA)						Gradasi Terbuka (BBA)					
	KAO (5.10%)						KAO (6.1%)					
	30 menit			24 jam			30 menit			24 jam		
	I	II	III	IV	V	VI	I	II	III	IV	V	VI
H (mm)	68.0	68.8	68.9	68.5	67.0	68.6	65.4	65.4	65.7	65.3	65.7	65.6
Stabilitas (lbs)	750	660	680	670	650	665	670	640	650	640	585	600
<i>Flow</i> (mm)	4.0	3.0	3.8	3.5	2.6	2.8	3.9	3.5	3.5	3.1	2.5	3

Prosedur pengujian perendaman pengerjaannya sama dengan *Marshall test*, namun sampel yang digunakan hanya pada nilai kadar aspal optimum. Variasi lama perendaman adalah 30 menit dan 24 jam pada suhu $60 \pm 1^\circ\text{C}$. Hasil perhitungan nilai indeks perendaman untuk campuran bisa dilihat pada tabel 4.16.

Tabel 4.16 Hasil Pengujian Perendaman

Sifat-Sifat Campuran	Hasil Pengujian	
	Gradasi Rapat (FAA)	Gradasi Terbuka (BBA)
Kadar aspal; %	5.10	6.10
Stabilitas perendaman standar (S1); Kg	2039	2055.91
Stabilitas perendaman 24 jam (S2); Kg	1962.11	1913,25
IKS (S2/S1); %	96,22 %	93.06 %

Dari hasil perhitungan yang terdapat pada Tabel 4.16 dapat dilihat bahwa terjadi penurunan nilai stabilitas standar setelah perendaman. Indeks Kekuatan Sisa tersebut lebih besar dari 90%, sehingga nilai IKS untuk campuran gradasi rapat memenuhi standar spesifikasi yang disyaratkan.

Pengaruh perendaman (*Immersion Test*) dimaksudkan untuk mengetahui ketahanan atau durabilitas campuran terhadap pengaruh air yang ditandai dengan hilangnya ikatan antara aspal dan butiran agregat. Nilai ini dipengaruhi oleh tingkat kelekatan agregat dengan aspal yang antara lain bergantung pada bentuk dan jumlah pori agregat, kadar aspal, kepadatan, kandungan rongga dan gradasi agregat. Parameter pengukurannya dinyatakan dengan nilai Indeks Kekuatan Sisa (IKS). Nilai IKS campuran didapat dari hasil perbandingan nilai stabilitas benda uji hasil rendaman 24 jam dengan nilai stabilitas benda uji standar pada hasil rendaman 30

menit. Pada Tabel 4.16 terlihat bahwa nilai Indeks Kekuatan Sisa (IKS) pada campuran pada gradasi rapat lebih tinggi dibandingkan gradasi terbuka. Hal ini menunjukkan bahwa campuran dengan menggunakan gradasi rapat mempunyai ketahanan yang lebih baik terhadap pengaruh air dibandingkan dengan campuran yang menggunakan gradasi terbuka. Hal ini dapat disebabkan karena pengaruh gradasi agregat yang menyebabkan rongga dalam campuran pada gradasi terbuka lebih besar sehingga membuat kekuatan campuran lebih rendah pada ketahanan campuran terhadap air (durabilitas).

4.7.3 Pengujian *Indirect Tensile Strenght (ITS)*

Kekakuan (*stiffness*) yang dimaksud disini adalah *Indirect Tensile Stiffness Modulus* (ITSM) pada suhu 20°C, dimana sampel diberi beban dinamis pada rentang regangan tertentu (kondisi elastis linier). Dalam penelitian ini digunakan alat ITSM (*Indirect Tensile Stiffness Modulus*) dan simulasi temperatur dari 20°C dan 60°C, hal ini untuk menyesuaikan keadaan suhu di Indonesia, disamping itu juga untuk mengetahui seberapa besar pengaruh perbedaan temperatur terhadap modulus kekakuan campuran beraspal. Pengujian *Indirect Tensile Stiffness Modulus* dilakukan di Laboratorium Perhubungan dan Bahan Konstruksi Jalan Universitas Udayana Denpasar, Bali. Proses pengujian dapat dilihat pada gambar 4.15. Hasil nilai modulus dari pengujian ITSM dapat dilihat pada Tabel 4.17. Untuk detail hasil pengujian dapat dilihat di lampiran C.



Gambar 4.15 Pengujian ITSM (*Indirect Tensile Stiffness Modulus*)

Tabel 4.17 Hasil nilai modulus dari pengujian ITSM

NILAI MODULUS (MPa)				
Lama Perendaman		0 (kering)	24 jam	30 menit
Temperatur		20°C	20°C	60°C
I	a	3296.00	4109.00	110.00
	b	3255.00	1445.00	147.00
	c	3118.00	3903.00	130.00
Rata - rata		3223.00	3152.33	129.00
II	a	3599.00	3772.00	128.00
	b	2841.00	3760.00	101.00
	c	3116.00	3821.00	154.00
Rata - rata		3185.33	3784.33	127.67
III	a	3476.00		
	b	3477.00		
	c	3542.00		
Rata - rata		3498.33		

Dari Tabel 4.17 terdapat data hasil pengujian menggunakan alat ITSM pada campuran aspal bergradasi terbuka (GABBA). Pada pengujian terdapat tiga perlakuan yaitu 3 benda uji untuk benda uji kering, 2 benda uji direndam dalam waterbath selama 24 jam (1 hari) dan 2 benda uji lainnya direndam selama 30 menit. Masing – masing benda uji dilakukan pengujian pada tiga titik yang berbeda.

Pengujian ITSM (*Indirect Tensile Stiffness Modulus*) dimaksudkan untuk mengetahui tegangan maksimum yang bisa ditahan oleh suatu campuran ketika diregangkan atau ditarik, sebelum campuran itu hancur. Modulus kekakuan didapatkan dengan melakukan uji tarik dan mencatat perubahan regangan dan tegangan. Nilai modulus kekakuan suatu campuran tidak bergantung pada ukuran campuran, melainkan karena faktor jenis campuran. Faktor – faktor yang dapat mempengaruhi seperti kadar aspal dalam campuran, gradasi campuran, temperatur, kelembaban campuran, bentuk agregat, dan penyiapan campuran aspal. Berdasarkan uji ITSM diperoleh modulus kekakuan campuran aspal dengan penggunaan agregat buatan geopolimer yang diuji pada suhu 20°C sebesar 3223 MPa dan nilai modulus kekakuan pada campuran yang telah direndam selama 24 jam sebesar 3152,33 Mpa, sedangkan untuk nilai modulus kekakuan pada campuran yang dilakukan pada temperatur 60°C sebesar 129 MPa.

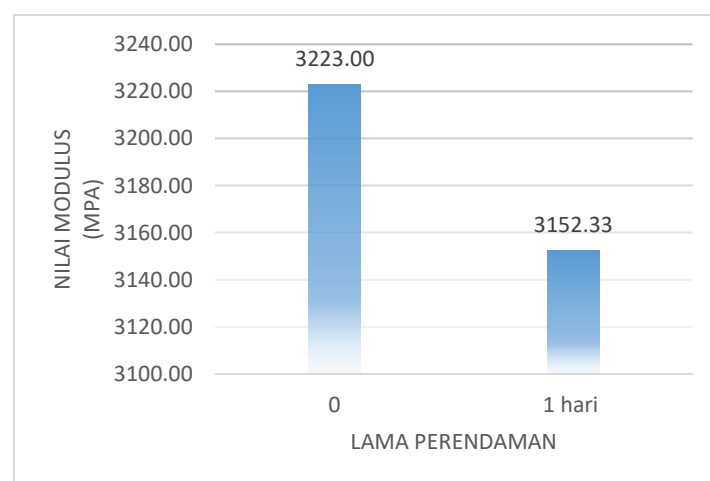
4.7.3.1 Pengaruh Lama Perendaman Terhadap Nilai Modulus Kekakuan

Pada pengujian kuat tarik dilakukan dengan variasi lama perendaman 0 (*unconditioned*) dan 1 hari (*conditioned*). Pengujian dilakukan pada suhu 20°C. Nilai TSR dapat menggambarkan perkiraan kerentanan campuran terhadap air. Potensi kerusakan terhadap air diindikasikan dengan perbandingan antara nilai ITS *conditioned* dengan *unconditioned*. Nilai Modulus dan TSR (*Tensile Strenght Ratio*) yang diperoleh dari penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 4.18 dan grafik pengaruh lama perendaman terhadap nilai modulus ditunjukkan pada Gambar 4.16.

Tabel 4.18 Hasil nilai Modulus Kekakuan dan TSR

Lama Perendaman	Nilai Modulus Kekakuan	TSR
	(Mpa)	(%)
0	3223.00	100%
1 hari	3152.33	98%

Pada Tabel 4.18 dapat dilihat bahwa nilai TSR akan semakin menurun seiring dengan bertambahnya durasi perendaman. Hal ini disebabkan karena pengaruh air akan menyebabkan turunnya kekuatan ikatan antar agregat dengan aspal, sehingga kuat tariknya berkurang. Pada akhir masa rendaman campuran aspal memenuhi persyaratan minimum nilai TSR yaitu 80%. Nilai TSR yang lebih dari 80% mengindikasikan bahwa campuran tahan terhadap kerusakan yang disebabkan oleh air. Nilai TSR yang di dapatkan sebesar 98%.

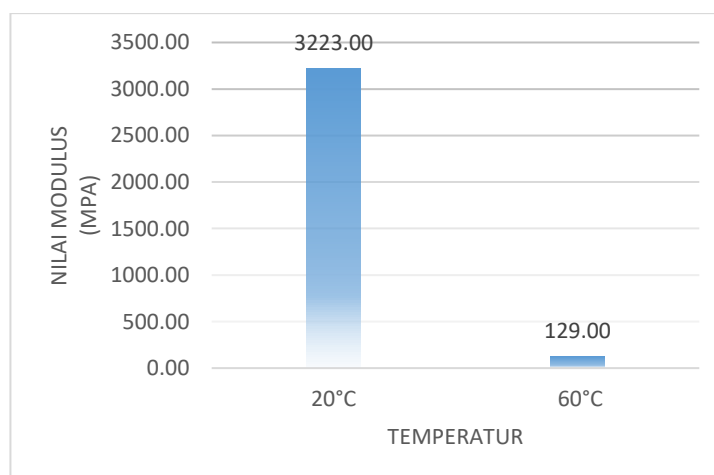


Gambar 4.16 Pengaruh lama perendaman terhadap nilai modulus

Kekuatan campuran aspal beton sangat dipengaruhi oleh stabilitas yang berhubungan dengan kekuatan ikatan atau penguncian antara agregat dan juga kekuatan lekatan antara agregat dan aspal. Pada Gambar 4.16 semakin lama dilakukan perendaman maka nilai modulus akan semakin menurun. Tajudin & Suparma, (2017) melakukan penelitian bahwa terjadi trend penurunan nilai modulus campuran seiring lamanya waktu perendaman. Hal ini diakibatkan air menyebabkan turunnya sifat adhesi atau kerekatan antara aspal dengan agregat. Menurunnya kerekatan yang diakibatkan oleh air ini akan mengurangi kohesivitas dari campuran, sehingga kekuatan campuran akan berkurang seiring dengan bertambahnya durasi perendaman.

4.7.3.2 Pengaruh Temperatur Terhadap Nilai Modulus Kekakuan

Pada pengujian kuat tarik dilakukan pada temperatur 20°C dan temperatur 60°C. Nilai Modulus pada yang diperoleh dari pengujian dapat dilihat pada Gambar 4.17.



Gambar 4.17 Nilai modulus campuran pada temperatur 20°C dan temperatur 60°C

Dari Gambar 4.17 menunjukkan bahwa nilai modulus kekakuan campuran pada temperatur 20°C sebesar 3223 MPa, sedangkan modulus kekakuan campuran pada temperatur 60°C sebesar 129 MPa. Dari hasil penelitian pada Gambar 4.17 didapat bahwa semakin tinggi temperatur perkerasan akan berakibat semakin rendahnya modulus kekakuan campuran beraspal.

Disini terlihat bahwa perbedaan temperatur perkerasan sangat berpengaruh terhadap nilai modulus kekakuan campuran, hal ini terjadi karena kadar aspal yang

tinggi. Respons aspal terhadap beban bersifat *viscous* elastis, maka sifat ini juga mempengaruhi perkerasan beraspal, terlebih bila kadar aspalnya tinggi (Brown, 1993). Sifat aspal sebagai bahan *thermoplastic* yang konsistensinya (viskositas) akan berubah sesuai dengan perubahan temperatur. Sifat termoplastis adalah sifat aspal yang dipengaruhi oleh perubahan temperatur (*temperatur suceptibility*). Aspal akan mencair bila dipanaskan, dan akan mengeras kembali bila didinginkan (Santosa, 1997). Muench & Littleton, (2016) memberikan catatan khusus, bahwa temperatur memiliki efek yang dominan pada kekakuan campuran beraspal. Faroz, (2017) dalam penelitiannya menunjukkan bahwa semakin tinggi temperatur yang diterima maka modulus kekakuan campuran semakin rendah. Dengan bertambahnya temperatur akan mengakibatkan aspal menjadi cair sehingga kemampuan aspal mengikat agregat menjadi berkurang. Semakin tinggi temperatur maka viskositasnya akan semakin menurun sehingga modulus kekakuan campuran semakin menurun.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari hasil penelitian dan analisis data yang telah dilakukan, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Nilai Kadar Aspal Optimum untuk campuran pada gradasi rapat adalah 5,1 %. Sedangkan untuk nilai Kadar Aspal Optimum untuk campuran pada gradasi terbuka adalah 6,1%. Nilai KAO pada gradasi rapat lebih rendah dibanding nilai KAO pada campuran aspal dengan gradasi terbuka. Hal ini disebabkan karena butir agregat pada gradasi rapat lebih bervariasi sehingga campuran menghasilkan rongga yang lebih sedikit. Nilai rongga yang kecil menyebabkan kadar aspal yang dibutuhkan juga lebih sedikit karena agregat telah saling mengisi.
2. Karakteristik perkerasan aspal beton yang dihasilkan pada gradasi rapat dan gradasi terbuka telah memenuhi spesifikasi yang ditentukan. Namun penggunaan gradasi terbuka menghasilkan rongga yang lebih besar serta penggunaan aspal yang lebih banyak. Gradasi rapat menghasilkan karakteristik berupa stabilitas 2039 kg; *flow* 3,6 mm; *Marshall Quotient* 571,79 kg/mm; VIM 3,77%; VMA 17,88%, dan VFB 78,97%. Gradasi terbuka menghasilkan karakteristik stabilitas 2055,91 kg; *flow* 3,63 mm; *Marshall Quotient* 566,76 kg/mm; VIM 3,83%; VMA 17,50%, dan VFB 78.15%.
3. Hasil uji perendaman *Marshall* dua jenis campuran aspal beton dengan penggunaan agregat buatan geopolimer telah memenuhi spesifikasi yang ditentukan yaitu min. 90%. Namun campuran dengan gradasi rapat memiliki nilai IRS yang lebih tinggi daripada campuran dengan gradasi terbuka. Nilai IRS pada campuran gradasi rapat sebesar 96,22%. Sedangkan nilai IRS pada campuran gradasi terbuka sebesar 93,06%. Hal ini dapat disebabkan karena rongga dalam campuran pada gradasi terbuka lebih besar sehingga membuat kekuatan campuran lebih rendah pada ketahanan campuran terhadap air (durabilitas).

4. Berdasarkan hasil pengujian modulus kekakuan dengan ITSM menunjukkan bahwa campuran aspal gradasi terbuka BBA memiliki nilai modulus kekakuan pada suhu 20°C sebesar 3223 MPa, sedangkan untuk nilai modulus pada campuran aspal beton dengan penggunaan agregat buatan geopolimer pada suhu 60°C yaitu sebesar 129 MPa. Penambahan temperatur dari 20°C ke 60°C menurunkan modulus kekakuan campuran aspal sebesar 96%. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan temperatur perkerasan akan diiringi dengan pengurangan modulus kekakuan.
5. Berdasarkan hasil analisis *Tensile Strenght Ratio* (TSR) menunjukan bahwa campuran aspal beton dengan penggunaan agregat buatan geopolimer pada gradasi terbuka tahan terhadap pengaruh rendaman. Campuran dengan gradasi terbuka memenuhi persyaratan minimum TSR 80% pada akhir masa perendaman. Nilai TSR yang didapatkan pada akhir masa perendaman selama 1 hari yaitu sebesar 98%.

5.2 Saran

Dari kesimpulan yang didapatkan ada beberapa saran yang dapat dilakukan untuk penelitian lebih lanjut. Rekomendasi yang dapat penulis berikan untuk menindaklanjuti hasil penelitian ini yaitu adanya penelitian lebih lanjut untuk meninjau nilai modulus campuran aspal beton dengan penggunaan agregat buatan geopolimer pada gradasi rapat FAA sehingga dapat membandingkan pengaruh gradasi terhadap nilai modulus kekakuan, serta sangat disarankan penelitian lebih lanjut terhadap bahan pengikat yang digunakan agar dapat meningkatkan kinerja campuran aspal beton dengan penggunaan agregat buatan geopolimer karena variasi tipe aspal juga ditengarai akan berpengaruh pada nilai modulus kekakuan.

DAFTAR PUSTAKA

- Agus, I. M., & Widhiawati, I. A. R. (2010). Pengaruh Gradasi Agregat Terhadap Karakteristik Campuran Laston, *14*(2), 198–207.
- Ahyudanari, E., Ekaputri, J. J., & Tardas, M. (2016). Analysis of Coal Waste Solidification as an Alternative Filler Material in Asphalt Concrete Mixture. *Materials Science Forum*, *841*(November), 65–71. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.841.65>
- Asphalt Institute. (1986). Asphalt hot-mix recycling; 2 ed. *Manual Series 20*, *20*(20), 46 blz.
- Atmodjo, U. H., & Hadiwardoyo, S. P. (2013). Kontribusi Aspal Beton Dalam Perubahan Karakteristik Modulus Resilient, 1–17.
- Badan Standardisasi Nasional. (2015). Cara uji ketahanan campuran beraspal panas terhadap kerusakan akibat rendaman (SNI 6753:2015), 16.
- Chindaprasirt, P., De Silva, P., Sagoe-Crentsil, K., & Hanjitsuwan, S. (2012). Effect of SiO₂ and Al₂O₃ on the setting and hardening of high calcium fly ash-based geopolymer systems. *Journal of Materials Science*, *47*(12), 4876–4883. <https://doi.org/10.1007/s10853-012-6353-y>
- D'Angelo, J., Harm, E., Bartoszek, J., Baumgardner, G., Corrigan, M., Cowsert, J., ... Yeaton, B. (2008). Warm-Mix asphalt : european Practice. *US Department of Transportation*, 68.
- Davidovits, J. (2008). *Geopolymer*.
- Ekaputri, J. J., & Triwulan, T. (2013). Sodium sebagai Aktivator Fly Ash , Trass dan Lumpur Sidoarjo dalam Beton Geopolimer. *Jurnal Teoritis Dan Terapan Bidang Rekayasa Sipil*, *20*(1), 1–10.
- Faroz, R. R. (2017). Studi Pengaruh Temperatur terhadap Modulus Kekakuan Campuran Menggunakan Aspal Berpolimer BituBale, *3*(4), 24–35.
- Garrick, N. W., & Biskur, R. R. (1990). *Effects of Asphalt Properties on Indirect Tensile Strength*. Transportation Research Record.
- Hakim, B., Widyatmoko, I., Fergusson, C., & Richardson, J. (2015). Uk airfield pavement design using french asphalts. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Transport*, *167*(1), 27–36. <https://doi.org/10.1680/tran.7.00034>

- Huang, Y. (1993). *Pavement Analysis And Design*. University Of Kentucky, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- Kandhal, P. S., & L.A. Cooley, J. (2001). *NCHRP REPORT 464 - The Restricted Zone In The Superpave Aggregate Gradation Specifification*.
- Karami, M., Nikraz, H., Sebayang, S., & Irianti, L. (2018). Laboratory experiment on resilient modulus of BRA modified asphalt mixtures. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 11(1), 38–46. <https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2017.08.005>
- Karyawan, I. D. A., Ahyudanari, E., & Ekaputri, J. J. (2017). Potential Use of Fly Ash Base-Geopolymeras Aggregate Substitution in Asphalt Concrete Mixtures. *International Journal of Engineering and Technology*, 9(5), 3744–3752. <https://doi.org/10.21817/ijet/2017/v9i5/170905005>
- Mitchell, M. R., Link, R. E., Dave, E. V., Braham, A. F., Buttlar, W. G., & Paulino, G. H. (2011). Development of a Flattened Indirect Tension Test for Asphalt Concrete. *Journal of Testing and Evaluation*, 39(3), 103084. <https://doi.org/10.1520/JTE103084>
- Muench, S., & Littleton, K. (2016). Recommendations for Extending Asphalt Pavement Surface Life within Washington State, (October).
- Sengoz, B., & Agar, E. (2007). Effect of asphalt film thickness on the moisture sensitivity characteristics of hot-mix asphalt. *Building and Environment*, 42(10), 3621–3628. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.10.006>
- Sudrajat. (2016). Penilaian Agregat Buatan Berbahan Dasar fly ash Untuk Bahan Perkerasan Jalan di Berbagai Variasi Suhu Perawatan.
- Suherman. (2012). Kinerja Modulus Resilien dan Deformasi Permanen Dari Campuran Lapis Antara (AC-BC) Yang Menggunakan Material Hasil Daur Ulang (RAP), 10(1).
- Sumiati, & Sukarman. (2014). Pengaruh Gradasi Agregat Terhadap Nilai Karakteristik Aspal Beton (Ac-Bc), 10(1), 85–91.
- Sunarjono, S., Samantha, R., Pengajar, D., Pascasarjana, P., Sipil, T., Surakarta, U. M., ... Muhammadiyah, U. (2012). Analisis kekuatan tarik material campuran sma (split mastic asphalt) grading 0/11 menggunakan sistem pengujian indirect tensile strength, 57–64.

- Suprpto. (2004). *Bahan dan Struktur Jalan Raya* (2nd ed.). Yogyakarta: KMTS FT UGM.
- Tajudin, A. N., & Suparma, L. B. (2017). Pengaruh Rendaman pada Indirect Tensile Strength Campuran AC - BC dengan Limbah Plastik sebagai Agregat Pengganti. *Media Komunikasi Teknik Sipil*, 23(2), 166–173. <https://doi.org/10.14710/mkts.v23i2.16128>
- Wardani, S. P. R. (2008). Pemanfaatan Limbah Batubara (Fly Ash) untuk Stabilisasi Tanah maupun Keperluan Teknik Sipil Lainnya dalam Mengurangi Pencemaran Lingkungan. *Pidato Pengukuhan Guru Besar*, 1–71.
- Widodo, S., & Setyaningsih, I. (2011). Penggunaan Alat Marshall Untuk Menguji Modulus Elastisitas Beton Aspal, 13–18.
- Yuliana, H., Karyawan, D. M. A., & Ahyudanari, E. (2018). The Effect of Slope Granulator on The Characteristic of Artificial Geopolymer Aggregate Used in Pavament. *Journal of Engineering Science and Technology*, 14(3).

BIODATA PENULIS



GUSTI MADE BAGUS BASKARA

Penulis dilahirkan di Kupang, 24 Nopember 1994. Penulis merupakan anak dari pasangan Ketut Suastika dan Ni Ketut Suandariani sebagai anak kedua dari 3 bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal di SDK Ngedukelu (Bajawa), SMPN 1 Ruteng (Manggarai), dan SMAN 1 Ruteng (Manggarai).

Setelah lulus dari Sekolah Menengah Atas pada tahun 2012, penulis melanjutkan pendidikan di perguruan tinggi pada program S1 Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Institut Teknologi Nasional Malang dan terdaftar dengan NIM 1221122. Selama menempuh S1 penulis aktif mengikuti kegiatan – kegiatan di beberapa kepanitiaan tingkat jurusan dan fakultas. Penulis pernah mengikuti program pelatihan aplikasi AutoCAD 2D/3D, aplikasi Staad/Pro, Sketchup, GRASP, RAM Design, dan GEARS selama enam bulan dan menerima sertifikat dari Professional Engineering Architect and Construction Service (PERACS) Group.

Pertengahan tahun 2017, penulis berkesempatan melanjutkan pendidikan program S2 pada bidang keahlian Manajemen Rekayasa Transportasi, Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan dan Kebumihan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya. Dengan NRP 03111750060008. Penulis sangat berharap agar Tesis ini dapat bermanfaat bagi pembaca serta bagi penulis sendiri.

Gusti Made Bagus Baskara (Mr.)

Civil Engineering Student

Sepuluh Nopember Institute of Technology, Surabaya

gstbagus32@gmail.com

(+62) 82231080528

LAMPIRAN A

Lampiran A.1

Formulir Pemeriksaan Agregat Kasar

Proyek : TESIS
Lokasi : Lab. Perhubungan Dan Bahan Konstruksi Jalan ITS
Pengujian :

BERAT JENIS DAN PENYERAPAN AGREGAT KASAR

Tanggal Pengujian : 21 Oktober 2018
Jenis Material : Agregat kasar

Pengambilan Data

Benda Uji		I	II	Rata – Rata
A	Benda uji kering oven (Bk) (gram)	2003.2	2002.7	2002.95
B	Berat benda uji kering permukaan jenuh (Bj) (gram)	2048	2052	2050
C	Berat benda uji didalam air (Ba) (gram)	1264	1260	1262
D	Berat Jenis (bulk) $\frac{Bk}{Bj - Ba}$	2.555	2.529	2.542
E	Berat Jenis kering permukaan jenuh $\frac{Bj}{Bj - Ba}$	2.612	2.591	2.602
F	Berat Jenis Semu (apparent) $\frac{Bk}{Bk - Ba}$	2.710	2.697	2.703
G	Penyerapan $\frac{Bj - Bk}{Bk} \times 100\%$	2.236	2.462	2,349

Proyek : TESIS
Lokasi : Lab. Perhubungan Dan Bahan Konstruksi Jalan, ITS
Pemohon :
Pengujian :

KEAUSAN AGREGAT

Tanggal Pengujian :
Jenis Material : Agregat kasar
Pengambilan Data

Saringan	Berat Benda Uji (gram)				
Lolos	Tertahan	Sebelum I	Sesudah I	Sebelum II	Sesudah II
		A	B	A	B
3/4"	1/2"	2500	3531,5		
1/2"	3/8"	2500			
3/8"	1/4"			2500	3390,5
1/4"	4"			2500	
Jumlah Berat		5000	3531.5	5000	3390,5
Jumlah Bola Baja		11		8	
Lolos Saringan No.12		1467,7		1609,5	

Perhitungan		I	II	Rata – Rata
A	Berat sebelum di uji	5000	5000	5000
B	Berat sesudah di uji	3531,5	3390,5	3461
C	Lolos saringan No. 12	1467,7	1609,5	1538,60
D	Keausan (%)	29,37	32,2	30,8

Proyek : TESIS
Lokasi : Lab. Perhubungan Dan Bahan Konstruksi Jalan, ITS
Pengujian :

KELEKATAN AGREGAT TERHADAP ASPAL

Tanggal Pengujian :
Jenis Material : Agregat kasar

Pengambilan Data

Pengamatan	Hasil Pengamatan/Kelekatan (%)
1	99
2	98
Rata – rata	98,5

Lampiran A.2

Formulir Pemeriksaan Agregat Halus

Proyek : TESIS
Lokasi : Lab. Perhubungan Dan Bahan Konstruksi Jalan, ITS
Pemohon :
Pengujian :

BERAT JENIS DAN PENYERAPAN AGREGAT HALUS

Tanggal Pengujian : 18 Oktober 2018
Jenis Material : Agregat halus

Pengambilan Data

Benda Uji		I	II	Rata – Rata
A	Berat benda uji kering permukaan jenuh (gram)	500	487.9	493.95
B	Berat benda uji kering oven (Bk) (gram)	482.7	473	477.85
C	Berat Piknometer + air (gram)	679.8	626.4	653.1
E	Berat Piknometer + benda uji + air (Bt) (gram)	993.5	932.8	963.15
F	Berat Jenis (bulk) $\frac{Bk}{B+200 - Bt}$	2,591	2,606	2,599
G	Berat Jenis kering permukaan jenuh $\frac{200}{B+200+ Bt}$	2,684	2,688	2,686
H	Berat Jenis Semu (apparent) $\frac{Bk}{B+Bk+Bt}$	2,856	2,839	2,848
I	Penyerapan $\frac{200-Bk}{Bk} \times 100\%$	2,937	2,993	2,965

Formulir Pemeriksaan Filler

Proyek : TESIS
Lokasi : Lab. Perhubungan Dan Bahan Konstruksi Jalan, ITS
Pemohon :
Pengujian :

BERAT JENIS DAN PENYERAPAN FILLER

Tanggal Pengujian : 18 Oktober 2018
Jenis Material : Filler

Pengambilan Data

Benda Uji		I	II	Rata – Rata
A	Berat benda uji kering permukaan jenuh (gram)	500	500	500
B	Berat benda uji kering oven (Bk) (gram)	490,5	494,1	492,3
C	Berat Piknometer + air (gram)	631,9	633,7	632,8
E	Berat Piknometer + benda uji + air (Bt) (gram)	940,9	948	944,45
F	Berat Jenis (bulk) $\frac{Bk}{B+200 - Bt}$	2,568	2,661	2,614
G	Berat Jenis kering permukaan jenuh $\frac{200}{B+200+ Bt}$	2,618	2,693	2,655
H	Berat Jenis Semu (apparent) $\frac{Bk}{B+Bk+Bt}$	2,702	2,748	2,725
I	Penyerapan $\frac{200-Bk}{Bk} \times 100\%$	1,937	1,194	1,399

Lampiran A.3

Formulir Pemeriksaan Agregat Buatan

Proyek : TESIS
Lokasi : Lab. Perhubungan Dan Bahan Konstruksi Jalan, ITS
Pemohon :

AGREGAT BUATAN GEOPOLIMER

Tanggal Pengujian : 18 Oktober 2018
Sumber Material : Paiton Power Plant Probolinggo

Pengambilan Data

Dimensi Data

No	Test	Rasio 2,5		Rerata
		Kemiringan Granulator 50°		
		I	II	
1	Berat Jenis (bulk) gr/cm ³	1,84	1,86	1,85
2	Berat Jenis kering permukaan jenuh gr/cm ³	1,96	1,97	1,97
3	Berat Jenis Semu (apparent) gr/cm ³	2,10	2,08	2,09
4	Penyerapan %	6,60	5,56	6,08
5	Kekalan Agregat terhadap Larutan Magnesium Sulfat %	6,685	3,754	5,219
6	Abrasi dengan Mesin Los Angeles %	24,06	21,50	22,78
7	Kelekatan Agregat terhadap Aspal %	98	96	97

Proyek : TESIS
Lokasi : Lab. Perhubungan Dan Bahan Konstruksi Jalan, ITS
Pemohon :

BERAT JENIS AGREGAT BUATAN GEOPOLIMER

Pengambilan Data

Benda Uji		I	II	Rata – Rata
A	Benda uji kering oven (Bk) (gram)	2500	2500	2500
B	Berat benda uji kering permukaan jenuh (Bj) (gram)	2665	2639	2652
C	Berat benda uji didalam air (Ba) (gram)	1308	1298	1303
D	Berat Jenis (bulk) $\frac{Bk}{Bj - Ba}$	1.842	1.864	1.853
E	Berat Jenis kering permukaan jenuh $\frac{Bj}{Bj - Ba}$	1.964	1.968	1.966
F	Berat Jenis Semu (apparent) $\frac{Bk}{Bk - Ba}$	2.097	2.080	2.089
G	Penyerapan $\frac{Bj - Bk}{Bk} \times 100\%$	6.600	5.560	6.080

Lampiran A.4

Formulir Pemeriksaan Aspal

Proyek : Penelitian Tesis
Lokasi : Lab. Perhubungan Dan Bahan Konstruksi Jalan ITS
Pelaksana :
Pengujian :

BERAT JENIS ASPAL

Tanggal Pengujian : 21 Oktober 2018
Jenis Material : Aspal Pen. 60/70 ex. Pertamina

Pengambilan Data

Benda Uji		I	II
A	Berat Picnometer + Tutup (gram)	27.20	27.20
B	Berat Picnometer + Tutup + Air (gram)	52.20	52.20
C	Berat Picnometer + Tutup + Aspal (gram)	36.80	39.80
D	Berat Picnometer + Tutup + Aspal + Air (gram)	52.50	52.60
E	Berat Jenis Aspal	1.032	1.033
F	Rata – Rata	1.033	

Proyek : Penelitian Tesis
Lokasi : Lab. Perhubungan Dan Bahan Konstruksi Jalan ITS
Pelaksana :
Pengujian :

PENETRASI ASPAL

SNI 06 – 2456 – 1991

Tanggal Pengujian : 22 Oktober 2018
Jenis Material : Aspal Pen. 60/70 ex. Pertamina

Pengambilan Data

Pembukaan Benda Uji	Perlakuan	Pembacaan Waktu	Pembacaan Suhu
	Benda Uji dipanaskan		Pembacaan suhu oven temperatur 110°C
	Mulai	09.15	
	selesai	09.30	
Mendinginkan Benda Uji	Didiamkan pada suhu ruang		
	Mulai	09.33	
	Selesai	10.33	
Perendaman Benda Uji	Direndam pada suhu 25°C		Pembacaan suhu waterbath temperatur 25°C
	Mulai	10.33	
	Selesai	11.33	
Pemeriksaan Benda Uji	Penetrasi 25°C, 100 gr, 5 detik		Pembacaan suhu penetrometer temperatur 25°C
	Mulai	11.33	
	Selesai	11.38	
Penetrasi pada suhu 25°C, beban 100 gr, 5 detik		A	B
Pengamatan			
1		66	63
2		63	63
3		65	61
4		65	64
5		64	62
Rata-rata		65	65
Rata-rata (A,B)		64	

Proyek : Penelitian Tesis
Lokasi : Lab. Perhubungan Dan Bahan Konstruksi Jalan ITS
Pelaksana :
Pengujian :

DAKTILITAS

SNI 06 – 2432 – 1991

Tanggal Pengujian : 22 Oktober 2018
Jenis Material : Aspal Pen. 60/70 ex. Pertamina

Pengambilan Data

Pembukaan Benda Uji	Perlakuan	Pembacaan Waktu	Pembacaan Suhu
	Benda Uji dipanaskan		Pembacaan suhu oven temperatur 110°C
	Mulai	13.37	
	selesai	13.49	
Mendinginkan Benda Uji	Didiamkan pada suhu ruang		
	Mulai	13.50	
	Selesai	14.50	
Perendaman Benda Uji	Suhu perendaman 25°C		Pembacaan suhu waterbath temperatur 25°C
	Mulai	14.50	
	Selesai	15.50	
Pengujian	Alat		Pembacaan suhu alat temperature 25°C
	Mulai	15.50	
	Selesai	16.10	

Daktalitas suhu 25°C 5 cm per menit		Pembacaan Alat
		cm
Pengamatan	1	> 100 cm
	2	> 100 cm
Rata-rata		> 100 cm

Proyek : Penelitian Tesis
Lokasi : Lab. Perhubungan Dan Bahan Konstruksi Jalan ITS
Pelaksana :
Pengujian :

TITIK LEMBEK ASPAL

SNI 06 – 2434 – 1991

Tanggal Pengujian : 22 Oktober 2018
Jenis Material : Aspal Pen. 60/70 ex. Pertamina

Pengambilan Data

Pembukaan Benda Uji	Perlakuan	Pembacaan Waktu	Pembacaan Suhu
	Benda Uji dipanaskan		Pembacaan suhu oven temperatur 110°C
	Mulai	09.15	
	selesai	09.30	
Mendinginkan Benda Uji	Didiamkan pada suhu ruang		
	Mulai	09.39	
	Selesai	10.39	
Perendaman Benda Uji	Suhu perendaman 25°C		Pembacaan suhu waterbath temperatur 25°C
	Mulai	10.39	
	Selesai	11.39	
Pengujian	Alat		Pembacaan suhu penetrometer temperatur 25°C
	Mulai	11.39	
	Selesai	11.42	

No	Waktu	Suhu
I	2:32,22	51°C
II	2:34,37	52°C
Selisih	2,15	1°C

Proyek : Penelitian Tesis
Lokasi : Lab. Perhubungan Dan Bahan Konstruksi Jalan ITS
Pelaksana :
Pengujian :

TITIK NYALA DAN BAKAR

SNI 06 – 2433 – 1991

Tanggal Pengujian : 22 Oktober 2018
Jenis Material : Aspal Pen. 60/70 ex. Pertamina

Pengambilan Data

Pembukaan Benda Uji	Perlakuan	Pembacaan Waktu	Pembacaan Suhu
	Benda Uji dipanaskan		Pembacaan suhu oven temperatur 110°C
	Mulai	14.37	
	selesai	14.48	
Penuangan Benda Uji	Didiamkan pada suhu ruang		Pembacaan suhu menuang temperatur 110°C
	Mulai	14.54	
	Selesai	14.56	
Pengujian	Alat		
	Mulai	14.58	
	Selesai	15.17	

Titik Nyala dan Titik Bakar	Pembacaan Pengukuran Pada Alat
Pengamatan I	256°C
Pengamatan II	258°C

LAMPIRAN B

Lampiran B.1 Formulir Perhitungan Karakteristik Marshall

B.1.1. Perhitungan kadar aspal optimum gradasi terbuka/BBA

No. Briket			Tebal Benda Uji	Kadar Aspal Pb	Kadar Agregat	Berat Benda Uji			volume benda uji	BJ Campuran		Vol. total aspal	Vol. total agregat	VIM	VMA	VFB	Stabilitas			flow	MQ
						Kering	SSD	Dalam Air		Kepadatan (Berat isi)	Maksimum (Teoritis)			3.5	≥ 15	76-82	Bacaan Alat	Angka Koreksi	Setelah Koreksi	2.5-4	≥ 250
			mm	%	%	gr	gr	Gr		Gmb	Gmm	%	%	%	%	%				mm	kg/mm
a			b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r	s	t
5	-	I	71.9	5	95	1173.4	1194.7	655	539.7	2.17	2.36	10.53	81.61	7.86	18.39	57.26	620	0.82	1687.154	4.40	383.44
		II	71.3	5	95	1158.7	1181.1	650	526.1	2.20	2.36	10.56	81.90	7.54	18.10	58.36	725	0.83	1995.246	3.30	604.62
		III	69.0	5	95	1177.1	1195	660	533	2.21	2.36	10.65	82.59	6.76	17.41	61.20	640	0.88	1856.155	3.30	562.47
Rata-rata									532.93	2.20	2.36	10.58	82.03	7.39	17.97	58.94	662	0.84	1846.18	3.67	516.8
5.5	-	I	69.4	5.5	94.5	1177.5	1199.8	668	536.8	2.19	2.35	11.79	82.68	5.53	17.32	68.09	640	0.87	1840.291	3.10	593.64
		II	71.3	5.5	94.5	1166.5	1186	657	529	2.21	2.35	11.75	82.34	5.92	17.66	66.51	750	0.83	2062.395	3.90	528.82
		III	68.1	5.5	94.5	1180.9	1196.9	665	531.9	2.22	2.35	11.83	82.90	5.28	17.10	69.16	705	0.90	2085.448	4.10	508.65
Rata-rata									532.56	2.21	2.35	11.79	82.64	5.58	17.36	67.92	698	0.87	1996.045	3.70	543.7
6	-	I	69.3	6	94	1189.4	1206.4	671	532.4	2.23	2.33	12.91	82.51	4.58	17.49	73.82	700	0.87	2015.71	4.00	503.93
		II	68.5	6	94	1194.5	1210.1	676	534.1	2.24	2.33	13.00	83.07	3.94	16.93	76.76	710	0.89	2081.172	4.00	520.29
		III	68.1	6	94	1181.5	1196.4	671	525.4	2.25	2.33	13.07	83.53	3.41	16.47	79.32	600	0.90	1776.502	3.90	455.51
Rata-rata									530.63	2.24	2.33	12.99	83.04	3.98	16.96	76.63	670	0.88	1957.795	3.97	493.2
6.5	-	I	67.4	6.5	93.5	1187.8	1197.8	679	518.8	2.29	2.32	14.41	84.59	1.01	15.41	93.51	600	0.91	1807.901	4.10	440.95
		II	68.1	6.5	93.5	1192.6	1198.5	677	528	2.26	2.32	14.40	84.49	1.12	15.51	92.81	595	0.90	1761.698	4.00	440.42
		III	67.1	6.5	93.5	1186.7	1192.9	673	523.9	2.27	2.32	14.37	84.33	1.31	15.67	91.70	550	0.92	1673.906	3.90	429.21
Rata-rata									523.56	2.27	2.32	14.39	84.47	1.15	15.53	92.67	582	0.91	1747.835	4.00	436.9
7	-	I	66.6	7	93	1177.9	1197.7	680	517.7	2.30	2.30	15.43	83.61	0.97	16.39	94.11	555	0.93	1708.231	4.00	427.06
		II	66.5	7	93	1189.3	1196	675	521	2.28	2.30	15.48	83.88	0.65	16.12	96.03	580	0.93	1789.97	4.30	416.27
		III	67.2	7	93	1180.2	1198.5	679	519.5	2.29	2.30	15.40	83.48	1.12	16.52	93.25	500	0.92	1514.847	3.90	388.42
Rata-rata									519.4	2.29	2.30	15.43	83.66	0.91	16.34	94.47	545	0.93	1671.016	4.07	410.6

B.1.2. Perhitungan kadar aspal optimum gradasi rapat/FAA

No. Briket			Tebal Benda Uji	Kadar Aspal Pb	Kadar Agregat	Berat Benda Uji			volume benda uji	BJ Campuran		Vol. total aspal	Vol. total agregat	VIM 3.5	VMA ≥ 15	VFB 76-82	Stabilitas			flow 2.5-4	MQ ≥ 250
						Kering	SSD	Dalam Air		Kepadatan (Berat isi)	Maksimum (Teoritis)						Bacaan Alat	Angka Koreksi	Setelah Koreksi		
			mm	%	%	gr	gr	Gr		Gmb	Gmm	%	%	%	%	%				mm	kg/mm
a			b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r	s	t
4.5	-	I	71.4	4.5	95.5	1167.1	1209.1	656	553.1	2.11	2.38	9.86	84.99	7.41	19.89	62.75	460	0.83	1261.895	3.20	394.34
		II	70.7	4.5	95.5	1177.9	1207.5	667	540.5	2.18	2.38	9.86	85.05	4.38	17.27	74.66	530	0.84	1477.278	2.60	568.18
		III	71.0	4.5	95.5	1174.2	1208.9	663	545.9	2.15	2.38	9.73	83.91	5.62	18.34	69.37	550	0.84	1523.330	3.00	507.78
Rata-rata									546.5	2.15	2.38	9.82	84.65	5.80	18.50	68.92	513	0.84	1420.834	2.93	490.10
5	-	I	69.5	5	95	1168.1	1206.2	667	539.2	2.17	2.37	11.11	85.77	4.34	18.19	76.12	655	0.87	1878.010	3.30	569.09
		II	69.3	5	95	1172.4	1202.3	663	539.3	2.17	2.37	11.15	86.06	4.01	17.90	77.60	550	0.87	1582.636	2.70	586.16
		III	69.4	5	95	1176.5	1206.1	670	536.1	2.19	2.37	11.02	85.06	3.10	17.12	81.90	595	0.87	1709.666	2.90	589.54
Rata-rata									538.2	2.18	2.37	11.09	85.63	3.82	17.74	78.54	600	0.87	1723.438	2.97	581.60
5.5	-	I	68.3	5.5	94.5	1174.8	1199.9	665	534.9	2.20	2.35	12.15	84.85	2.42	17.49	86.20	625	0.89	1838.473	4.00	459.62
		II	68.0	5.5	94.5	1175.2	1206.3	665	541.3	2.17	2.35	12.03	84.00	3.54	18.44	80.83	615	0.90	1822.608	3.50	520.75
		III	68.4	5.5	94.5	1171.1	1195.8	661	534.8	2.19	2.35	12.07	84.28	2.70	17.74	84.76	570	0.89	1674.332	2.80	597.98
Rata-rata									537	2.19	2.35	12.08	84.38	2.89	17.89	83.93	603	0.89	1778.471	3.43	526.11
6	-	I	67.5	6	94	1176	1192.8	665	527.8	2.23	2.34	13.46	85.67	0.39	16.74	97.70	540	0.91	1625.623	3.00	541.87
		II	66.5	6	94	1164.5	1182.4	653	529.4	2.20	2.34	13.28	84.57	1.66	17.81	90.69	650	0.93	2006.001	4.00	501.50
		III	67.4	6	94	1165.3	1179.9	653	526.9	2.21	2.34	13.36	85.04	1.12	17.36	93.53	590	0.91	1777.769	3.40	522.87
Rata-rata									528	2.21	2.34	13.36	85.09	1.06	17.30	93.97	593	0.92	1803.131	3.47	522.08
6.5	-	I	66.6	6.5	93.5	1162.4	1180.6	653	527.6	2.20	2.32	14.42	84.26	0.89	18.11	95.08	545	0.93	1677.452	3.30	508.32
		II	66.4	6.5	93.5	1155.9	1174.9	650	524.9	2.20	2.32	14.41	84.24	0.94	18.15	94.83	620	0.94	1918.540	3.00	639.51
		III	66.9	6.5	93.5	1164.6	1181.4	655	526.4	2.21	2.32	14.48	84.62	0.48	17.77	97.31	585	0.91	1759.481	4.20	418.92
Rata-rata									526.3	2.21	2.32	14.43	84.38	0.77	18.01	95.74	583	0.93	1785.157	3.50	522.25

Lampiran B.2

Formulir Perhitungan Immersion Test

B.2.1. Perhitungan pengujian perendaman pada kadar aspal optimum gradasi terbuka/BBA

No. Briket			Tebal Benda Uji	Kadar Aspal Pb	Kadar Agregat	Berat Benda Uji			volume benda uji	BJ Campuran		VIM	VMA	VFB	Stabilitas			flow	MQ
						Kering	SSD	Dalam Air		Kepadatan (Berat isi)	Maksimum (Teoritis)	3.5	≥ 15	76-82	Bacaan Alat	Angka Koreksi	Setelah Koreksi		≥ 250
			mm	%	%	gr	gr	gr		Gmb	Gmm	%	%	%				mm	kg/mm
a			b	c	d	e	f	g	h = f-g	i = e/h	j	k	l	m	n	o	p	q	r
perendaman 30 menit	6.1	I	65.40	6.1	93.9	1178.6	1185.7	653	524.7	2.21	2.33	3.72	17.41	78.64	670	0.95	2113.4	3.90	541.9
		II	65.73	6.1	93.9	1176.1	1184.6	652	521.6	2.21	2.33	3.90	17.57	77.78	640	0.95	2016.1	3.50	576.0
		III	65.47	6.1	93.9	1177.4	1185.9	653	521.9	2.21	2.33	3.85	17.53	78.02	650	0.95	2038.2	3.50	582.4
Rata-rata			65.5						522.7	2.21	2.33	3.83	17.50	80.84	653	0.95	2055.9	3.63	566.8
perendaman 24 jam	6.1	I	65.47	6.1	93.9	1165.4	1177.6	653	524.6	2.22	2.33	3.33	17.08	80.52	640	0.96	2021.4	3.10	652.1
		II	65.33	6.1	93.9	1160.6	1174.9	650	524.9	2.21	2.33	3.78	17.47	78.36	585	0.95	1833.2	2.50	733.3
		III	65.47	6.1	93.9	1164.6	1175.2	655	520.2	2.24	2.33	2.58	16.43	84.32	600	0.95	1885.2	3.00	628.4
Rata-rata			65.4						523.2	2.22	2.33	3.23	16.99	81.07	608	0.95	1913.3	2.87	671.2

B.2.2. Perhitungan pengujian perendaman pada kadar aspal optimum gradasi rapat/FAA

No. Briket			Tebal Benda Uji	Kadar Aspal Pb	Kadar Agregat	Berat Benda Uji			volume benda uji	BJ Campuran		VIM	VMA	VFB	Stabilitas			flow	MQ
						Kering	SSD	Dalam Air		Kepadatan (Berat isi)	Maksimum (Teoritis)	3.5	≥ 15	76-82	Bacaan Alat	Angka Koreksi	Setelah Koreksi		≥ 250
			mm	%	%	gr	gr	gr		Gmb	Gmm	%	%	%				mm	kg/mm
a			b	c	d	e	f	g	h = f-g	i = e/h	j	k	l	m	n	o	p	q	r
perendaman 30 menit	5.1	I	68.0	5.1	94.9	1178	1197.1	657	540.1	2.18	2.37	3.57	17.72	79.83	750	0.90	2222.69	4.00	555.67
		II	68.8	5.1	94.9	1181.7	1198.9	656	542.9	2.18	2.37	3.77	17.89	78.93	660	0.88	1920.98	3.00	640.33
		III	68.9	5.1	94.9	1181.8	1197.9	654	543.9	2.17	2.37	3.94	18.03	78.16	680	0.88	1973.57	3.80	519.36
Rata-rata									542.3	2.18	2.37	3.76	17.88	78.97	696.67	0.89	2039.08	3.60	571.79
perendaman 24 jam	5.1	IV	68.5	5.1	94.9	1180.2	1193.6	654	539.6	2.19	2.37	3.30	17.49	81.11	670	0.89	1961.15	3.50	560.33
		V	67.0	5.1	94.9	1183.7	1193.5	652	541.5	2.19	2.37	3.36	17.53	80.85	650	0.92	1980.04	2.60	761.55
		VI	68.6	5.1	94.9	1185.3	1199.3	655	544.3	2.18	2.37	3.72	17.85	79.13	665	0.89	1945.15	2.80	694.69
Rata-rata									541.8	2.18	2.37	3.46	17.62	80.36	661.67	0.90	1962.11	2.97	672.19

Lampiran B.3

B.3.1. Keterangan Pada Tabel Perhitungan Karakteristik *Marshall*

Notasi	Keterangan	
a	Nomor Briket	-
b	Tebal benda uji (mm)	-
c	Kadar aspal (%)	-
d	Kadar Agregat (%)	-
e	Berat kering (gr)	-
f	Berat dalam keadaan jenuh/SSD (gr)	-
g	Berat dalam air (gr)	-
h	Volume benda uji (ml)	f-g
i	Berat isi benda uji (Gmb)	e/h
j	BJ Maksimum (Teoritis)	$\frac{100}{\frac{\% \text{agregat}}{\text{bj. agregat}} + \frac{\% \text{aspal}}{\text{bj. aspal}}}$
k	Volume total aspal (%)	$(c \times i) / \text{bj. aspal}$
l	Volume total agregat (%)	$((100 - c) / \text{bj. efektif}) \times i$
m	Rongga dalam campuran (%)	$100 \times ((j - i) / j)$
n	Ronggan dalam Agregat (%)	$100 - k$
o	Rongga terisi aspal (%)	$\frac{k}{n} \times 100$
p	Stabilitas bacaan alat	pembacaan dial
q	Angka koreksi ketebalan	lihat tabel
r	Stabilitas terkoreksi kalibrasi alat	$n \times o \times \text{kalibrasi alat}$ [7,28 (lbs) x 0,454 (kg)]
s	pelelehan (<i>flow</i>) (mm)	pembacaan dial
t	<i>Marshall quotient</i> (kg/mm)	r/s

B.3.2. Tabel Angka Koreksi Pada Perhitungan Stabilitas Marshall

Isi	Tebal Benda Uji	Angka Koreksi
200-213	25.4	5.56
214-225	27	5.00
226-237	28.6	4.55
238-250	30.2	4.17
251-264	31.8	3.85
265-276	33.3	3.57
277-289	34.9	3.33
290-301	35.5	3.03
302-316	38.1	2.78
317-328	39.7	2.5
329-340	41.3	2.27
341-353	42.9	2.08
354-367	44.4	1.92
368-379	46	1.79
380-392	47.6	1.67
393-405	49.2	1.56
406-420	50.8	1.47
421-431	52.4	1.39
432-443	54	1.32
444-456	55.6	1.25
457-470	57.2	1.19
471-482	58.7	1.14
483-495	60.3	1.09
496-508	61.9	1.04
509-522	63.5	1.00
523-535	65.1	0.96
536-546	66.7	0.93
547-559	68.3	0.89
560-573	69.9	0.86
574-585	71.4	0.83
586-598	73	0.81
599-610	74.6	0.78
611-625	76.2	0.76

LAMPIRAN C

Indirect Tensile Modulus Test

Test method: BS DD213-1993 (British Standard - Draft for Development)

Data fileName: C:\SET UP DATA\File ARYA\ITM\ITM 2019\ITM1_a.D003

Template file name: C:\IPCglobal UTS\003 IT Modulus Test\Templates\Template April 2016\Adit.P003

Test date & time: 12/28/2018 12:28:32 PM

Project: -

Operator: Arya

Comments:

Setup Parameters

Target temperature (°C): 20

Loading pulse width (ms): 250

Pulse repetition period (ms): 3000

Conditioning pulse count: 5

Target deformation (µm): 5

Estimated Poisson's ratio: 0.35

Estimated modulus (MPa): 3000

Contact force (N): 20

Specimen Information

Identification: ITM1.a

Remarks...

28-12-18

Dimensions	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	Average	Std Dev
Length (mm)	65.1	65.3	65.9	64.7			65.3	0.5
Diameter (mm)	101.6	101.6	101.6	101.6			101.6	

Cross-sectional area (mm²): 8107.3

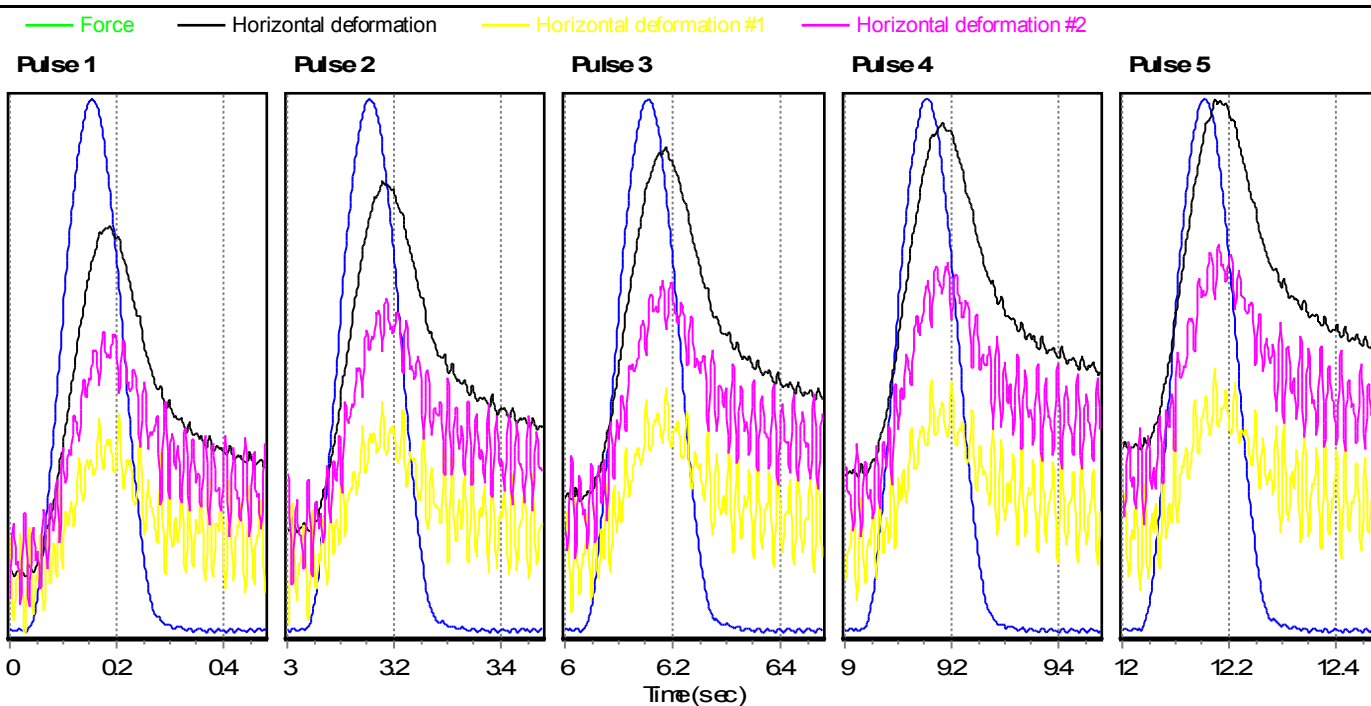
Test Results

Conditioning pulses: 5

Core temperature (°C): 20.1

Skin temperature (°C): 19.8

	Pulse 1	Pulse 2	Pulse 3	Pulse 4	Pulse 5	Mean	Std. Dev.	%CV
Stiffness modulus (MPa)	3423	3359	3332	3324	3348	3357	35.03	1.04
Adjusted stiffness modulus (MPa)	3349	3283	3294	3262	3294	3296	28.77	0.87
Peak horizontal deformation (µm)	4.84	4.95	4.97	5.00	4.96	4.94	0.05	1.09
Load area factor	0.55	0.54	0.56	0.55	0.56	0.55	0.01	1.32
Peak loading force (N)	1745	1748	1742	1750	1747	1746	2.84	0.16
Load rise time (ms)	110	113	110	115	109	111.6	2.15	1.92
Horizontal deformation #1 (µm)	1.96	2.90	2.14	2.29	2.15	2.29	0.32	14.10
Horizontal deformation #2 (µm)	2.88	2.05	2.83	2.72	2.81	2.66	0.31	11.62
Seating force (N)	21	18	23	16	19	20	2.38	12.11



Indirect Tensile Modulus Test

Test method: BS DD213-1993 (British Standard - Draft for Development)

Data fileName: C:\SET UP DATA\File ARYA\ITM\ITM 2019\ITM1_b.D003

Template file name: C:\IPCglobal UTS\003 IT Modulus Test\Templates\Template April 2016\Adit.P003

Test date & time: 12/28/2018 12:37:40 PM

Project: -

Operator: Arya

Comments:

Setup Parameters

Target temperature (°C): 20
Loading pulse width (ms): 250
Pulse repetition period (ms): 3000
Conditioning pulse count: 5

Target deformation (µm): 5
Estimated Poisson's ratio: 0.35
Estimated modulus (MPa): 3000
Contact force (N): 20

Specimen Information

Identification: ITM1.b

Remarks...

28-12-18

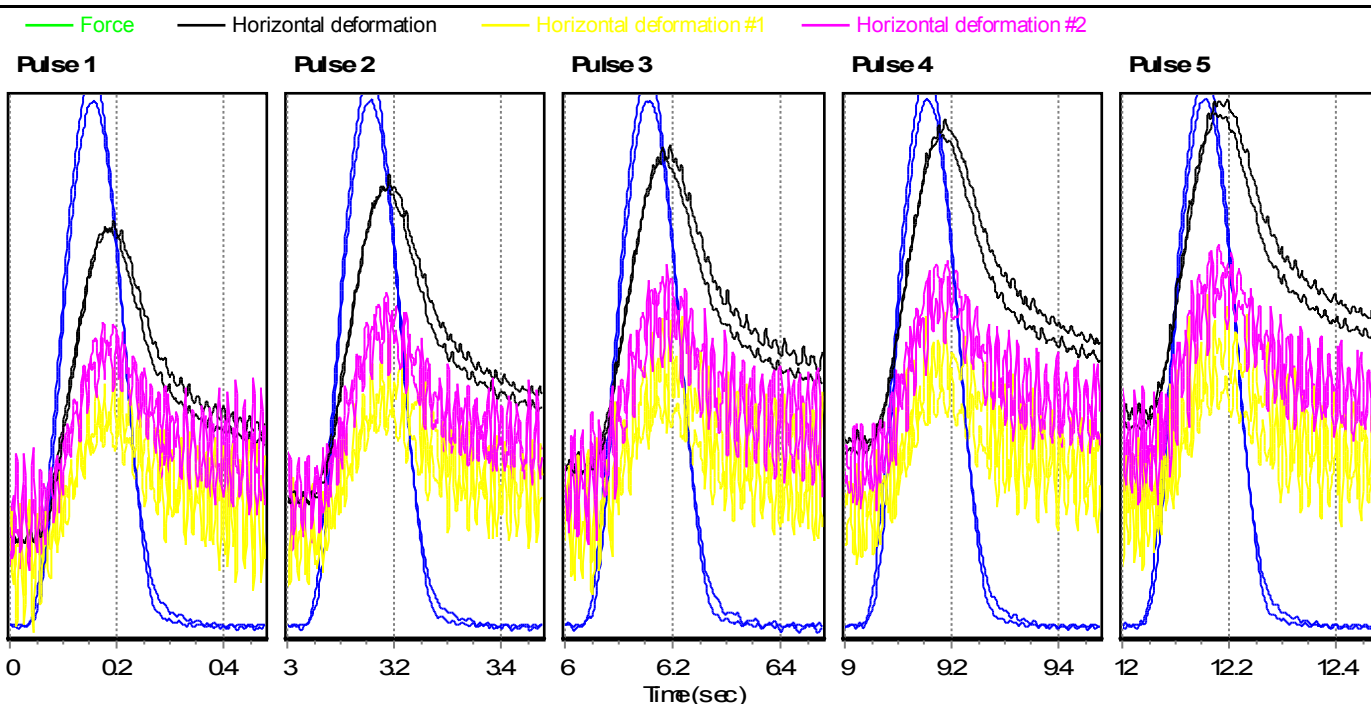
Dimensions	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	Average	Std Dev
Length (mm)	65.1	65.3	65.9	64.7			65.3	0.5
Diameter (mm)	101.6	101.6	101.6	101.6			101.6	

Cross-sectional area (mm²): 8107.3

Test Results

Conditioning pulses: 5
Core temperature (°C): 20.6
Skin temperature (°C): 20.3

	Pulse 1	Pulse 2	Pulse 3	Pulse 4	Pulse 5	Mean	Std. Dev.	%CV
Stiffness modulus (MPa)	3182	3105	3102	3127	3172	3138	33.43	1.07
Adjusted stiffness modulus (MPa)	3307	3220	3181	3209	3255	3234	43.54	1.35
Peak horizontal deformation (µm)	4.95	5.10	5.07	5.08	5.00	5.04	0.06	1.10
Load area factor	0.57	0.57	0.55	0.55	0.55	0.56	0.01	1.97
Peak loading force (N)	1657	1665	1656	1672	1671	1664	6.61	0.40
Load rise time (ms)	107	108	102	106	109	106.3	2.47	2.32
Horizontal deformation #1 (µm)	2.77	3.46	2.95	2.96	3.61	3.15	0.32	10.31
Horizontal deformation #2 (µm)	2.18	1.63	2.12	2.12	1.40	1.89	0.32	16.72
Seating force (N)	24	21	26	17	17	21	3.38	15.96



Indirect Tensile Modulus Test

Test method: BS DD213-1993 (British Standard - Draft for Development)

Data fileName: C:\SET UP DATA\File ARYA\ITM\ITM 2019\ITM1_c.D003

Template file name: C:\IPCglobal UTS\003 IT Modulus Test\Templates\Template April 2016\Adit.P003

Test date & time: 12/28/2018 12:46:08 PM

Project: -

Operator: Arya

Comments:

Setup Parameters

Target temperature (°C): 20
Loading pulse width (ms): 250
Pulse repetition period (ms): 3000
Conditioning pulse count: 5

Target deformation (µm): 5
Estimated Poisson's ratio: 0.35
Estimated modulus (MPa): 3000
Contact force (N): 20

Specimen Information

Identification: ITM1.c

Remarks...

28-12-18

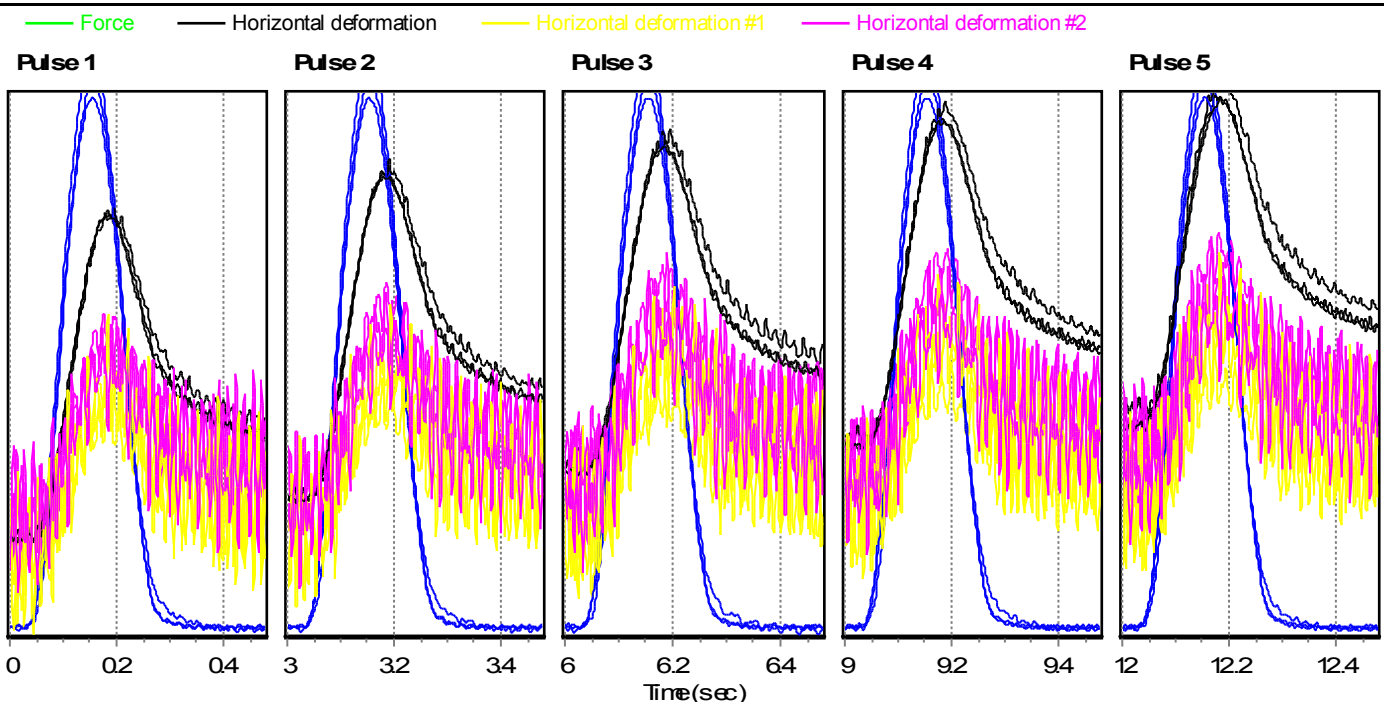
Dimensions	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	Average	Std Dev
Length (mm)	65.1	65.3	65.9	64.7			65.3	0.5
Diameter (mm)	101.6	101.6	101.6	101.6			101.6	

Cross-sectional area (mm²): 8107.3

Test Results

Conditioning pulses: 5
Core temperature (°C): 20.4
Skin temperature (°C): 19.7

	Pulse 1	Pulse 2	Pulse 3	Pulse 4	Pulse 5	Mean	Std. Dev.	%CV
Stiffness modulus (MPa)	3111	3145	3105	3115	3068	3109	24.80	0.80
Adjusted stiffness modulus (MPa)	3129	3161	3092	3133	3076	3118	30.45	0.98
Peak horizontal deformation (µm)	4.92	4.87	4.93	4.92	5.00	4.93	0.04	0.87
Load area factor	0.55	0.54	0.53	0.55	0.54	0.54	0.01	1.28
Peak loading force (N)	1611	1612	1612	1613	1616	1613	1.52	0.09
Load rise time (ms)	114	109	112	107	113	110.9	2.58	2.33
Horizontal deformation #1 (µm)	3.38	3.25	3.23	3.35	3.57	3.36	0.12	3.63
Horizontal deformation #2 (µm)	1.54	1.62	1.71	1.57	1.43	1.57	0.09	5.72
Seating force (N)	20	22	18	16	19	19	1.81	9.48



Indirect Tensile Modulus Test

Test method: BS DD213-1993 (British Standard - Draft for Development)

Data fileName: C:\UJI 2019\ITSM 2019\ITM 60 mhs ITS\ITM14_a.D003

Template file name: C:\IPCglobal UTS\003 IT Modulus Test\Templates\Template April 2016\Adit.P003

Test date & time: 12/29/2018 2:54:36 PM

Project: -

Operator: Arya

Comments: 29-12-18

Setup Parameters

Target temperature (°C): 20
Loading pulse width (ms): 250
Pulse repetition period (ms): 3000
Conditioning pulse count: 5

Target deformation (µm): 5
Estimated Poisson's ratio: 0.35
Estimated modulus (MPa): 3000
Contact force (N): 20

Specimen Information

Identification: ITM14.a

Remarks...

Dimensions	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	Average	Std Dev
Length (mm)	68.3	67.6	68.4	68.7			68.3	0.5
Diameter (mm)	101.6	101.6	101.6	101.6			101.6	

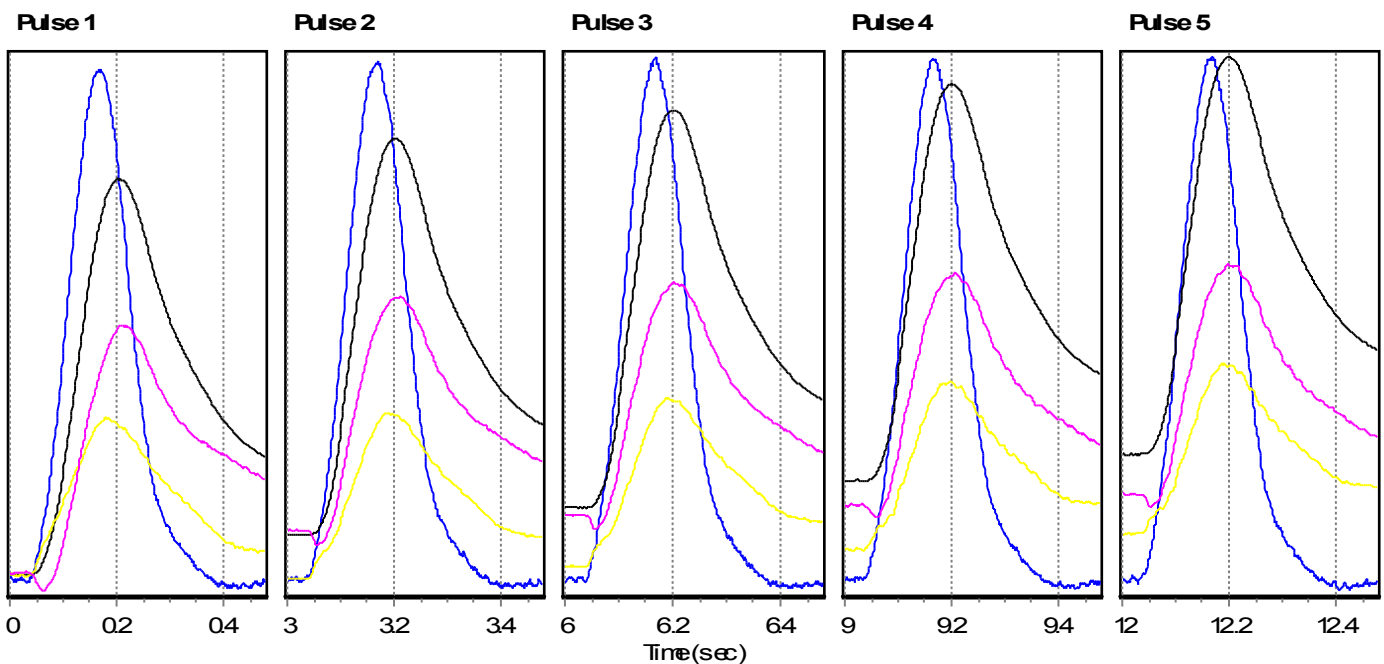
Cross-sectional area (mm²): 8107.3

Test Results

Conditioning pulses: 5
Core temperature (°C): 54.3
Skin temperature (°C): 58.3

	Pulse 1	Pulse 2	Pulse 3	Pulse 4	Pulse 5	Mean	Std. Dev.	%CV
Stiffness modulus (MPa)	110	111	112	111	111	111	0.62	0.56
Adjusted stiffness modulus (MPa)	109	110	111	110	110	110	0.60	0.55
Peak horizontal deformation (µm)	19.04	19.20	19.27	19.26	19.30	19.21	0.09	0.49
Load area factor	0.51	0.52	0.51	0.50	0.52	0.51	0.01	1.22
Peak loading force (N)	230	235	237	235	236	235	2.37	1.01
Load rise time (ms)	121	127	126	121	125	124.1	2.47	1.99
Horizontal deformation #1 (µm)	7.35	7.95	8.01	8.12	8.12	7.91	0.29	3.63
Horizontal deformation #2 (µm)	11.68	11.25	11.26	11.14	11.18	11.30	0.20	1.74
Seating force (N)	21	20	20	21	20	20	0.53	2.59

Force Horizontal deformation Horizontal deformation #1 Horizontal deformation #2



Indirect Tensile Modulus Test

Test method: BS DD213-1993 (British Standard - Draft for Development)

Data fileName: C:\UJI 2019\ITSM 2019\ITM 60 mhs ITS\ITM14_b.D003

Template file name: C:\IPCglobal UTS\003 IT Modulus Test\Templates\Template April 2016\Adit.P003

Test date & time: 12/29/2018 3:05:19 PM

Project: -

Operator: Arya

Comments: 29-12-18

Setup Parameters

Target temperature (°C): 20
Loading pulse width (ms): 250
Pulse repetition period (ms): 3000
Conditioning pulse count: 5

Target deformation (μm): 5
Estimated Poisson's ratio: 0.35
Estimated modulus (MPa): 3000
Contact force (N): 20

Specimen Information

Identification: ITM14.b

Remarks...

Dimensions	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	Average	Std Dev
Length (mm)	68.3	67.6	68.4	68.7			68.3	0.5
Diameter (mm)	101.6	101.6	101.6	101.6			101.6	

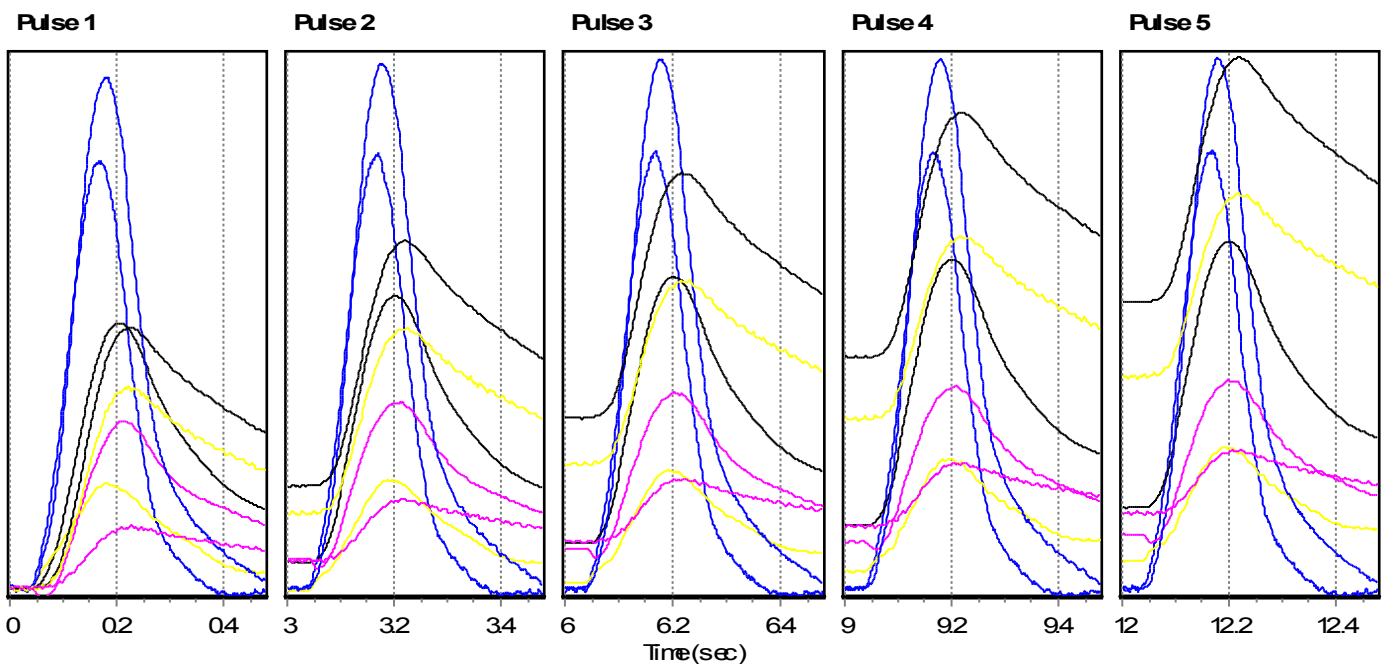
Cross-sectional area (mm²): 8107.3

Test Results

Conditioning pulses: 5
Core temperature (°C): 56.9
Skin temperature (°C): 59.8

	Pulse 1	Pulse 2	Pulse 3	Pulse 4	Pulse 5	Mean	Std. Dev.	%CV
Stiffness modulus (MPa)	141	151	152	151	150	149	4.19	2.81
Adjusted stiffness modulus (MPa)	139	149	150	150	148	147	4.06	2.76
Peak horizontal deformation (μm)	17.79	17.07	17.06	17.16	17.31	17.28	0.27	1.57
Load area factor	0.50	0.50	0.48	0.52	0.50	0.50	0.01	2.50
Peak loading force (N)	276	284	285	285	286	283	3.87	1.37
Load rise time (ms)	132	124	121	128	125	126.0	3.79	3.01
Horizontal deformation #1 (μm)	13.75	12.94	12.83	12.75	12.89	13.03	0.36	2.79
Horizontal deformation #2 (μm)	4.05	4.14	4.23	4.41	4.42	4.25	0.15	3.47
Seating force (N)	20	19	20	20	21	20	0.41	2.03

Force Horizontal deformation Horizontal deformation #1 Horizontal deformation #2



Indirect Tensile Modulus Test

Test method: BS DD213-1993 (British Standard - Draft for Development)

Data fileName: C:\UJI 2019\ITSM 2019\ITM 60 mhs ITS\ITM14_c.D003

Template file name: C:\IPCglobal UTS\003 IT Modulus Test\Templates\Template April 2016\Adit.P003

Test date & time: 12/29/2018 3:17:53 PM

Project: -

Operator: Arya

Comments: 29-12-18

Setup Parameters

Target temperature (°C): 20
Loading pulse width (ms): 250
Pulse repetition period (ms): 3000
Conditioning pulse count: 5

Target deformation (µm): 5
Estimated Poisson's ratio: 0.35
Estimated modulus (MPa): 3000
Contact force (N): 20

Specimen Information

Identification: ITM14.c

Remarks...

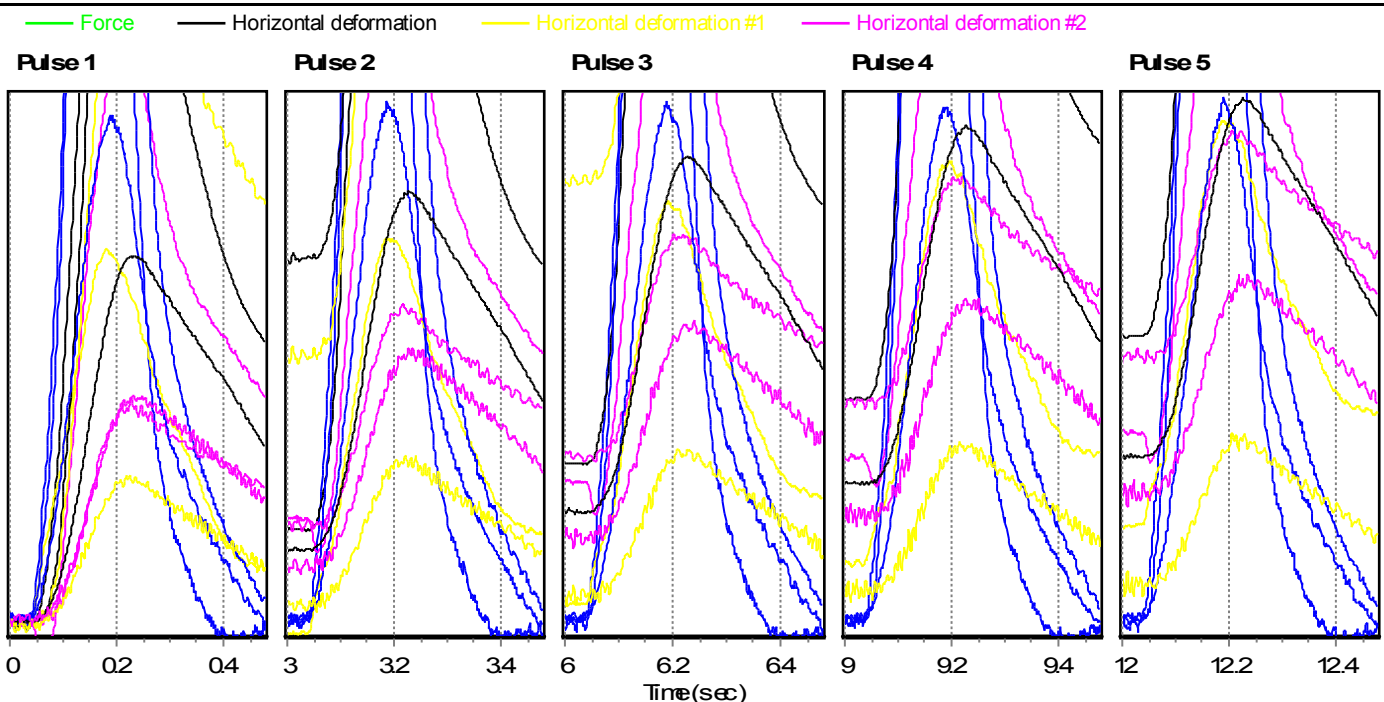
Dimensions	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	Average	Std Dev
Length (mm)	68.3	67.6	68.4	68.7			68.3	0.5
Diameter (mm)	101.6	101.6	101.6	101.6			101.6	

Cross-sectional area (mm²): 8107.3

Test Results

Conditioning pulses: 5
Core temperature (°C): 58.1
Skin temperature (°C): 60.4

	Pulse 1	Pulse 2	Pulse 3	Pulse 4	Pulse 5	Mean	Std. Dev.	%CV
Stiffness modulus (MPa)	128	132	133	131	133	131	1.65	1.25
Adjusted stiffness modulus (MPa)	127	131	131	129	132	130	1.54	1.18
Peak horizontal deformation (µm)	7.28	7.23	7.20	7.25	7.30	7.25	0.03	0.48
Load area factor	0.52	0.51	0.50	0.51	0.50	0.51	0.01	1.28
Peak loading force (N)	103	105	105	104	107	105	1.28	1.22
Load rise time (ms)	142	132	136	143	136	137.5	4.06	2.95
Horizontal deformation #1 (µm)	2.90	2.80	3.05	2.91	2.94	2.92	0.08	2.80
Horizontal deformation #2 (µm)	4.38	4.43	4.15	4.35	4.36	4.33	0.09	2.18
Seating force (N)	20	20	20	20	19	20	0.25	1.27



Indirect Tensile Modulus Test

Test method: BS DD213-1993 (British Standard - Draft for Development)

Data fileName: C:\UJI 2019\ITSM 2019\ITM 60 mhs ITS\ITM16_a.D003

Template file name: C:\IPCglobal UTS\003 IT Modulus Test\Templates\Template April 2016\Adit.P003

Test date & time: 1/8/2019 12:58:44 PM

Project: -

Operator: Arya

Comments: 8-1-19

Setup Parameters

Target temperature (°C): 20
Loading pulse width (ms): 250
Pulse repetition period (ms): 3000
Conditioning pulse count: 5

Target deformation (µm): 5
Estimated Poisson's ratio: 0.35
Estimated modulus (MPa): 3000
Contact force (N): 20

Specimen Information

Identification: ITM16.a

Remarks...

Dimensions	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	Average	Std Dev
Length (mm)	68.0	67.0	67.4	67.5			67.5	0.4
Diameter (mm)	101.6	101.6	101.6	101.6			101.6	0.0

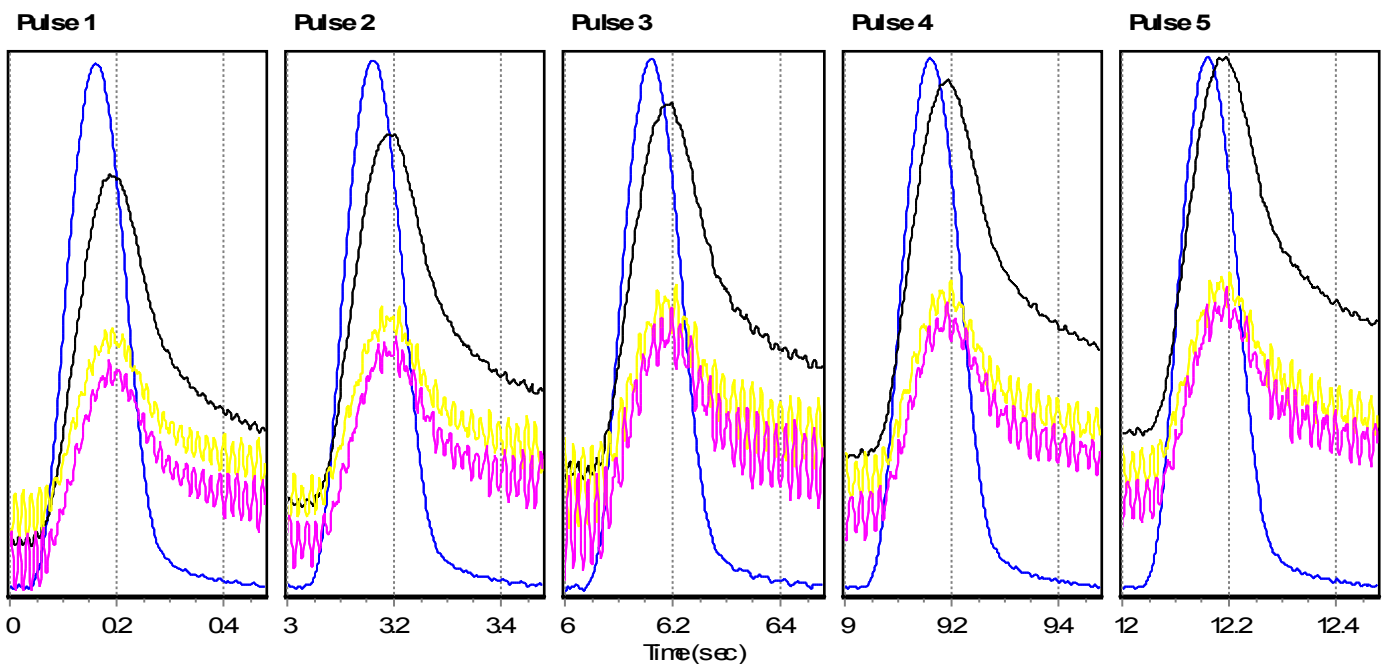
Cross-sectional area (mm²): 8107.7

Test Results

Conditioning pulses: 5
Core temperature (°C): 20.9
Skin temperature (°C): 20.4

	Pulse 1	Pulse 2	Pulse 3	Pulse 4	Pulse 5	Mean	Std. Dev.	%CV
Stiffness modulus (MPa)	4039	4006	3979	3925	3922	3974	45.44	1.14
Adjusted stiffness modulus (MPa)	4176	4167	4084	4062	4058	4109	51.65	1.26
Peak horizontal deformation (µm)	4.90	4.96	5.05	5.10	5.12	5.02	0.08	1.67
Load area factor	0.53	0.54	0.52	0.53	0.53	0.53	0.01	1.36
Peak loading force (N)	2153	2162	2185	2179	2185	2173	12.85	0.59
Load rise time (ms)	108	107	113	108	109	109.0	2.06	1.89
Horizontal deformation #1 (µm)	2.52	2.58	1.75	2.04	2.09	2.20	0.31	14.18
Horizontal deformation #2 (µm)	2.38	2.38	3.29	3.06	3.03	2.83	0.38	13.37
Seating force (N)	21	27	10	21	17	19	5.51	28.90

Force Horizontal deformation Horizontal deformation #1 Horizontal deformation #2



Indirect Tensile Modulus Test

Test method: BS DD213-1993 (British Standard - Draft for Development)

Data fileName: C:\UJI 2019\ITSM 2019\ITM 60 mhs ITS\ITM16_b.D003

Template file name: C:\IPCglobal UTS\003 IT Modulus Test\Templates\Template April 2016\Adit.P003

Test date & time: 1/8/2019 1:17:34 PM

Project: -

Operator: Arya

Comments: 8-1-19

Setup Parameters

Target temperature (°C): 20
Loading pulse width (ms): 250
Pulse repetition period (ms): 3000
Conditioning pulse count: 5

Target deformation (µm): 5
Estimated Poisson's ratio: 0.35
Estimated modulus (MPa): 3000
Contact force (N): 20

Specimen Information

Identification: ITM16.b

Remarks...

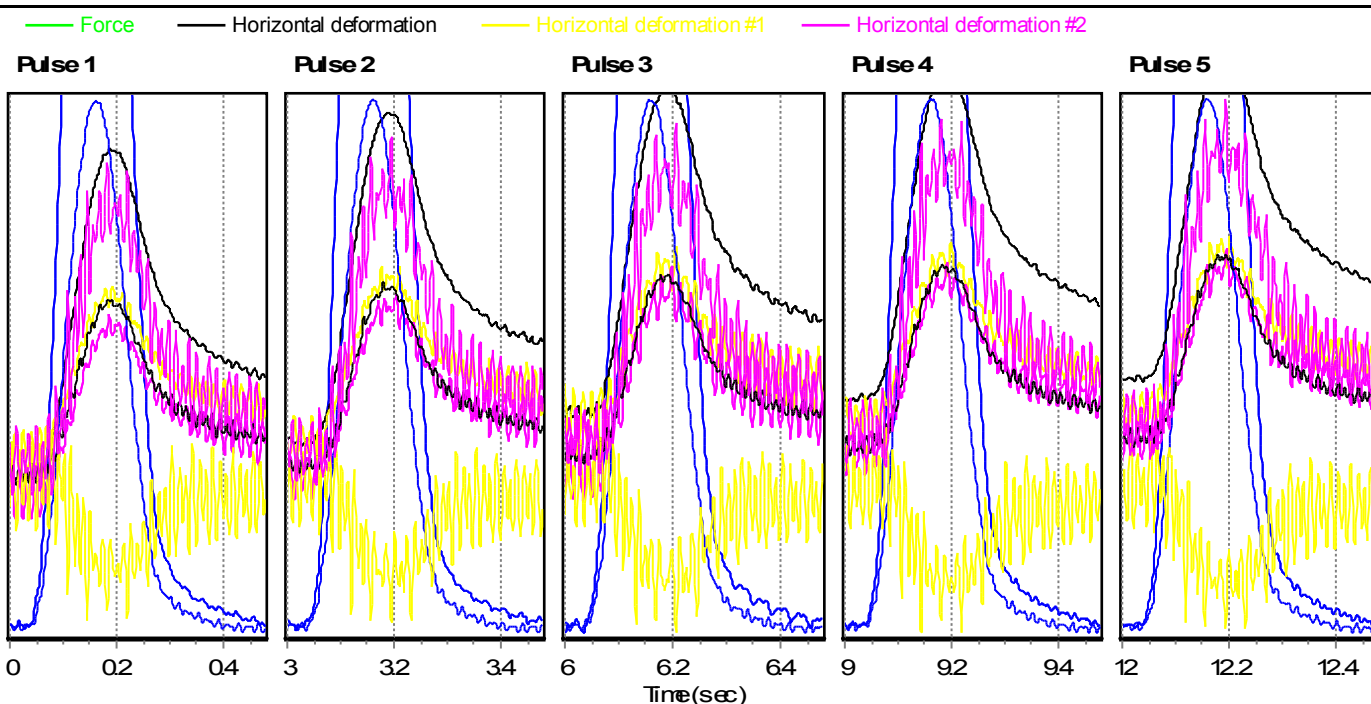
Dimensions	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	Average	Std Dev
Length (mm)	68.0	67.0	67.4	67.5			67.5	0.4
Diameter (mm)	101.6	101.6	101.6	101.6			101.6	

Cross-sectional area (mm²): 8107.3

Test Results

Conditioning pulses: 5
Core temperature (°C): 20.7
Skin temperature (°C): 20.3

	Pulse 1	Pulse 2	Pulse 3	Pulse 4	Pulse 5	Mean	Std. Dev.	%CV
Stiffness modulus (MPa)	1364	1503	1535	1277	1380	1412	94.82	6.71
Adjusted stiffness modulus (MPa)	1426	1583	1599	1347	1445	1480	96.39	6.51
Peak horizontal deformation (µm)	6.49	5.93	5.76	6.98	6.45	6.32	0.44	6.89
Load area factor	0.53	0.55	0.53	0.55	0.53	0.54	0.01	1.74
Peak loading force (N)	964	970	962	970	969	967	3.40	0.35
Load rise time (ms)	116	107	104	109	104	108.2	4.45	4.11
Horizontal deformation #1 (µm)	1.93	1.59	1.51	2.15	1.83	1.80	0.23	12.88
Horizontal deformation #2 (µm)	4.56	4.34	4.25	4.83	4.62	4.52	0.21	4.56
Seating force (N)	22	20	27	20	21	22	2.54	11.43



Indirect Tensile Modulus Test

Test method: BS DD213-1993 (British Standard - Draft for Development)

Data fileName: C:\UJI 2019\ITSM 2019\ITM 60 mhs ITS\ITM16_c.D003

Template file name: C:\IPCglobal UTS\003 IT Modulus Test\Templates\Template April 2016\Adit.P003

Test date & time: 1/8/2019 1:26:25 PM

Project: -

Operator: Arya

Comments: 8-1-19

Setup Parameters

Target temperature (°C): 20

Loading pulse width (ms): 250

Pulse repetition period (ms): 3000

Conditioning pulse count: 5

Target deformation (μm): 5

Estimated Poisson's ratio: 0.35

Estimated modulus (MPa): 3000

Contact force (N): 20

Specimen Information

Identification: ITM16.c

Remarks...

Dimensions	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	Average	Std Dev
Length (mm)	68.0	67.0	67.4	67.5			67.5	0.4
Diameter (mm)	101.6	101.6	101.6	101.6			101.6	

Cross-sectional area (mm²): 8107.3

Test Results

Conditioning pulses: 5

Core temperature (°C): 21.0

Skin temperature (°C): 20.6

	Pulse 1	Pulse 2	Pulse 3	Pulse 4	Pulse 5	Mean	Std. Dev.	%CV
Stiffness modulus (MPa)	3790	3761	3759	3742	3734	3757	19.45	0.52
Adjusted stiffness modulus (MPa)	3963	3890	3921	3874	3865	3903	35.59	0.91
Peak horizontal deformation (μm)	4.97	5.01	5.03	5.05	5.05	5.02	0.03	0.63
Load area factor	0.53	0.51	0.53	0.51	0.51	0.52	0.01	1.53
Peak loading force (N)	2050	2050	2059	2059	2053	2054	4.00	0.19
Load rise time (ms)	109	112	108	108	107	108.7	1.63	1.50
Horizontal deformation #1 (μm)	3.27	3.48	3.09	3.28	3.12	3.25	0.14	4.26
Horizontal deformation #2 (μm)	1.70	1.53	1.95	1.77	1.93	1.78	0.15	8.68
Seating force (N)	15	22	20	19	23	20	2.79	13.95

Force Horizontal deformation Horizontal deformation #1 Horizontal deformation #2

